

Rullamuovauskoneen rullien pinnoitteet

Sakari Tuovinen

Opinnäytetyö

Koulutusala Tekniikan ja liikenteen ala			
Koulutusohjelma Kone- ja tuotantotekniikan koulutusohjelma			
Työn tekijä(t) Sakari Tuovinen			
Työn nimi Rullamuovauskoneen rullien pinnoitteet			
Päiväys	23.5.2013	Sivumäärä/Liitteet	59
Ohjaaja(t) tekn. lisensiaatti, lehtori Mika Mäkinen, lehtori Eeva Jauhiainen			
Toimeksiantaja/Yhteistyökumppani(t) Samesor Oy			
Tiivistelmä <p>Tämän opinnäytetyön aiheena oli tutkia rullamuovauskoneen rullien pinnoitteita. Työ toteutettiin osana Pinnoitushanke-projektia, johon kuuluvat Savonia-ammattikorkeakoulu sekä metallialan yritykset Samesor Oy ja Hydroline Oy. Työ sai alkunsa Samesor Oy:n tarpeesta parantaa rullien kulumiskestävyyttä ja kitkaominaisuuksia ja saada näin kilpailuetua kilpaileviin yrityksiin.</p> <p>Työssä tutkittiin rullamuovauskoneen rullien pinnoitteiden kulumiskestävyyttä, kitkaominaisuuksia, mikrokovuutta ja pinnankarheutta. Mittausmenetelminä pinnoitetta tutkittaessa käytettiin Vickersin kovuuskoetta sekä Pin On Disk -tappikulutuskoetta. Työssä tutkittiin kolmella erilaisella pinnoitusmenetelmällä käsiteltyä teräskappaletta sekä pinnoittamatonta kappaletta, jonka materiaali oli teräs. Pinnoitteet olivat kovakromi, kemiallinen nikkeli ja nitrattu teräs.</p> <p>Opinnäytetyössä tutkittiin pinnoitteiden ominaisuuksia ja saatiin laaja raportti niiden pintaominaisuuksista. Tulosten avulla voidaan määrittää jatkossa, kuinka pinnoitteet soveltuvat käytettäviksi rullamuovauskoneen rullissa. Mahdollisissa tulevissa jatkotutkimuksissa voitaisiin testiolosuhteet mukauttaa vastaamaan enemmän koneen todellista käyttöympäristöä sekä tutkia lisää erilaisia pinnoitteita.</p>			
Avainsanat rullamuovauskone, kulumiskestävyys, kitkaominaisuudet, Pin On Disk, kovakromi, kemiallinen nikkeli, nitraus			
julkinen			

Field of Study Technology, Communication and Transport			
Degree Programme Degree Programme in Mechanical Engineering and Production Technology			
Author(s) Sakari Tuovinen			
Title of Thesis The Coatings of the Roll Forming Machine's Rolls			
Date	May 23, 2013	Pages/Appendices	59
Supervisor(s) Mr Mika Mäkinen, Lecturer (Lic. Tech.); Mrs. Eeva Jauhiainen, Lecturer			
Client Organisation/Partners Samesor Oy			
<p>Abstract</p> <p>The aim of this final year project was to study the coatings in the rolls of the roll forming machine. The project was carried out as part of the Pinnoitushanke-project which is run by Savonia University of Applied Sciences as well as the metal industry companies Samesor Oy and Hydroline Oy. The project originated from Samesor Oy's need to improve the wear resistance and friction characteristics of the rolls and thus achieve a competitive advantage over rival companies.</p> <p>In the project, the wear resistance, friction characteristics, microhardness and surface roughness of the roll forming machine were studied. Vicker's hardness test and Pin On Disk-tests were used as methods of measurement when studying the coating. There were three steel items with three different coating methods studied in the project, as well as an uncoated item whose material was steel. The surfaces were hard chrome, electroless nickel and nitriding steel.</p> <p>As a result of this final year project an extensive report on the surface properties of the coatings was made. In future the results will help to determine how well the coatings apply to be used in the roll forming machines. For further studies, the testing conditions could be adapted to match the machine's actual environment of use and a wider range of different types of coatings could be studied.</p>			
<p>Keywords</p> <p>coating, roll forming machine, wear resistance, friction characteristics, microhardness, surface roughness, Pin On Disk, hard chrome, electroless nickel, nitriding steel</p>			
public			

ALKUSANAT

Haluaisin kiittää seuraavia henkilöitä, joiden ohjaus auttoi työn valmistumisessa. Kiitoksen ansaitsee ohjaava opettaja lehtori Mika Mäkinen, jota haluan kiittää käytännön ja kirjallisen työn ohjauksesta.

Haluan osoittaa kiitokseni myös Savonia-ammattikorkeakoulun pinnoituslaboratorion henkilökunnalle, johon kuuluivat Jussi Räisä, Juha Miettinen ja Pekka Nuutinen.

Kuopiossa 23.5.2013

Sakari Tuovinen

SISÄLTÖ

1	JOHDANTO	8
2	SAMESOR OY	9
3	RULLAMUOVAUSTEKNIikka	10
4	METALLIEN PINNOITTEET JA PINTAKÄSITTELYT	12
4.1	Metalliset pinnoitteet	12
4.2	Diffuusiopinnoitteet	13
4.3	Kovakromaus	14
4.4	Kemiallinen nikkelöinti	16
4.5	Typetys	17
5	PINNOITTEIDEN TRIBOLOGIA	19
5.1	Kuluminen	21
5.1.1	Kulumistyytit ja kulumisen lajittelu liikkeen mukaan	22
5.1.2	Kulumismekanismit ja kulumismekanismin määrittäminen	24
5.1.3	Kuluminen liukutilanteessa	27
5.2	Kitka	27
6	KOEJÄRJESTELYT	30
6.1	Kokeiden kulku	30
6.1.1	Esikokeet	30
6.1.2	Varsinaiset kokeet	31
6.2	Pin On Disk -tappikulutuskuone	31
7	KOEKAPPALEIDEN TUTKIMUSMENETELMÄT	33
7.1	Pin on Disk -kulutus- ja kitkamittauskuone	33
7.2	Pin On Disk -kuulatesti ja kulutusuran mittaus	34
7.3	Silmämääräinen tarkastelu	35
7.4	Kovuusmittaus	35
7.4.1	Brinell -kovuuskuone	36
7.4.2	Rockwell -kovuuskuone	37
7.4.3	Vickers -kovuuskuone	37
7.5	Pinnankarheusmittaus	40
8	TULOKSET JA TULOSTEN ANALYSOINTI	43
8.1	Pin on Disk -kulutus- ja kitkamittauskuone	43
8.2	Pin On Disk -kuulatesti ja kulutusuran mittaus	43
8.3	Silmämääräinen tarkastelu	45
8.4	Vickersin mikrokovuuskuone	45

8.5 Pinnankarheusmittaus.....	47
9 MITTAUSLAITTEEN VALINTA JA MITTAUSVIRHEET	51
9.1 Mittauslaitteen valinta	51
9.2 Virhearviointi.....	51
9.2.1 Systemaattinen virhe.....	52
9.2.2 Satunnainen virhe	52
9.2.3 Karkea virhe	52
9.3 Mittaustarkkuuteen vaikuttaminen.....	53
10 KEHITYSIDEOITA.....	55
11 YHTEENVETO	56
LÄHTEET	58

1 JOHDANTO

Opinnäytetyö on osa Savonia-ammattikorkeakoulun ja suomalaisten metallialan teollisuusyritysten yhteistä Pinnoitushanke-projektia. Opinnäytetyö liittyy projektissa mukana olevan Samesor Oy:n yrityseseen. Opinnäytetyön aiheen valinta perustui Samesor Oy:n tarpeeseen parantaa rullamuovauskoneen rullien kulumiskestävyyttä ja kitkaominaisuuksia.

Opinnäytetyössä tutkittaville kappaleille suoritetaan erinäisiä kokeita. Tarkoituksena on tutkia mm. kappaleiden kulutuskestävyyttä, tehdä kitkamittauksia eri vastinpareilla ja tutkia pinnoitteen tarttumista eri rullien pinnoitteisiin. Lisäksi koko linjan toimivuutta tulee arvioida eri rullien pinnoitteilla. Näin voidaan tarkastella osa-alueita, kuten pellin muovautumista ja kulumista. Tutkimuslaitteistona toimivat Pin On Disk -laite, jolla tutkitaan kitkaa ja kulumista. Laitteella ajetaan myös tutkittavaan sauvaan kulutusura, josta kuluminen tutkitaan mikroskoopilla. Rullien kovuus tutkitaan puolestaan kovuusmittauslaitteilla. Lisäksi käytetään pinnankarheudenmittalaitetta pinnankarheuden tutkimiseen sekä mikroskooppia kappaleiden pintaa tutkittaessa. Tutkimuspaikka oli Savonia-ammattikorkeakoulun pinnoituslaboratorio, joka sijaitsee Technopoliksen tiloissa.

Työn tavoitteena on saada eri pinnoitteista laaja raportti, jonka avulla Samesor Oy pystyy valitsemaan parhaimman pinnoitteen käyttämiinsä rulliin. Pinnoitteen tulee olla kestävä ja kilpailukykyinen hinnaltaan ja sillä tulee olla hyvät kitkaominaisuudet. Lisäksi sen on tuotava Samesor Oy:lle kilpailuetua. Opinnäytetyössä tulee selvittää erilaisten pinnoitteiden ominaisuuksia.

2 SAMESOR OY

Samesor Oy on kuopiolainen yksityisomistuksessa oleva yritys, joka on toiminut vuodesta 1969 alkaen. Samesor Oy työllistää n. 60 henkilöä. Yritys valmistaa innovatiivisia tuotantolinjoja ohutlevyteollisuudelle maailmanlaajuisesti. Tuotteita ovat erilaiset linjastot ja koneet, jotka valmistavat kattopeltejä, julkisivupaneeleita, kattoristikoiita, talon runkoja ja tuotteita kapeasta metallilevystä (kuva 1). Lisäksi Samesor Oy valmistaa peltileikkureita, joita saa liitettyä muihin laitteisiin. (Samesor Oy 2012)

Samesor Oy:n menestys perustuu satoihin toimitettuihin linjastoihin ja asiakkaiden menestykseen. Samesor Oy onkin toimittanut noin 850 tuotantolinjaa asiakkailleen, yli 50 maahan. Päämarkkina-alueet ovat Skandinavia, Venäjä, Eurooppa, Aasia ja Amerikat. Samesor Oy tarjoaa seuraavia palveluita: tuotekehitys, kone- ja tuotesuunnittelu, kokonaisten tuotantolinjojen valmistus, linjojen asennus ja käyttöönotto ja after sales -palvelut. After sales -palveluihin kuuluu varaosapalvelu, vianmäärityspalvelu rullamuovauslinjoille, huoltotoimenpiteet, linjaston päivitykset, muutokset ja modernisoinnit. Samesor Oy tarjoaa sekä yksittäisiä tuotantolinjoja että koneita sekä joustavia tuotantosoluja, joiden avulla pystytään valmistamaan edistyksellisiä tuotteita teräsrakentamiseen. Samesor Oy on panostanut viime vuosina vahvasti tuote- ja palvelutarjonnan lisäämiseen ja yhtiö onkin toimialansa teknologiajohtaja. Samesor Oy:n keskeiset tuotteet, kuten modulaariset kattopeltilinjat ja teräspalkkijärjestelmät, ovat auttaneet yritystä kasvussa. (Samesor Oy 2012.)



KUVA 1. Rullamuovauslinja Samesor Oy:n tiloissa Kelloniemessä (Samesor Oy.)

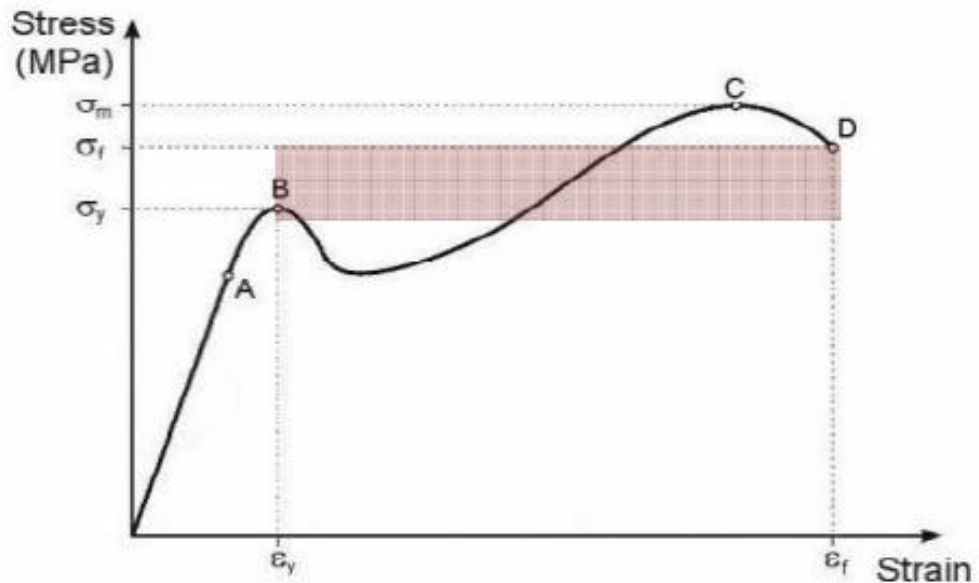
3 RULLAMUOVAUSTEKNIikka

Rullamuovaus on yksi metallin kylmämuokkausprosesseista. Rullamuovauksessa kelalla olevasta metallinauhasta muovataan profiilia (kuva 2). Muokattu profiili voi olla avoin tai tietyissä rajoissa suljettu. Se voi sisältää mm. lävistyksiä, taivutuksia tai pookkauksia. Tyypillisessä rullamuovauslinjassa on peräkkäin aseteltuja rullapareja tai -ryhmiä, jotka muokkaavat vaiheittain peltinauhan eli rainan haluttuun muotoon. Sen voidaan sanoa olevan tehokas ja edullinen tapa valmistaa profiileja suurin tuotantonopeuksin.



KUVA 2. Rullamuovauslinja (Samesor Oy.)

Kylmämuokkauksella saavutetaan hienompi raerakenne ja tarkemmat mittatoleranssit ja lisäksi se muokkauslujittuu. Muokattavien materiaalien ainepaksuudet ovat 0,13 – 20 mm (Samesorilla 0,35 – 4 mm). Käytettävän materiaalin tulee olla muovautuvaa, eli myötö- ja murtolujuuden välinen ero tulee olla vähintään 50 N/mm² ja venymä vähintään 20 % (kuvio 1). Materiaalin osalta tulee tiedostaa teräksen vanhenemisilmiö, sillä teräksen vanhetessa sen myötölujuus ja murtolujuus kasvavat, mikä riippuu seostuksesta ja varastointilämpötilasta. (Nygård 2012.)



KUVIO 1. Jännitys-venymäpiirros (Nygård 2012.)

Rullamuovaus soveltuukin hyvin massatuotteiden valmistusmenetelmäksi. Liitettäessä rullamuovauslinja automaattisiin tuotantolinjoihin saadaan aikaan kokonaisuus, jolla päästään merkittävään tuotantonopeuteen (linjanopeudet 10 – 200 m/min). Se asettaa hyvin vähän rajoituksia muokattavan profiilin poikkileikkauksen muodolle, joten profiili voidaan valita lujuusopillisesti tai rakenteen toiminnan kannalta optimaaliseksi. Tuotannon aikaiset profiilin muutokset ovat rajoitettuja. Pituutta sen sijaan pystytään lisäämään taas lähes rajattomasti ja lyhentämään koneen rakenteiden sallimissa rajoissa. (Nygård 2012.)

Esimerkkejä rullamuovattavista materiaaleista ovat:

- kylmävalssatut ohutlevyteräkset EN 10130 (CR2)
- kuumasinkityt ohutlevyteräkset EN 10142 (Z02)
- muovipinnoitetut ohutlevyt, joissa on perusmateriaalina pääasiassa kuumasinkitty ohutlevy
- RST
- alumiini
- kupari
- materiaalipaksuudet 0,13 – 20 mm. (Nygård 2012.)

4 METALLIEN PINNOITTEET JA PINTAKÄSITTELYT

Metallista valmistetut tuotteet viimeistellään usein pinnoittamalla. Tuotteiden pinnoittamisella parannetaan ulkonäköä, säästetään perusmetallia, lisätään pinnan kemiallista ja mekaanista kestävyyttä, parannetaan liukuominaisuuksia ja kehitetään kontaktiominaisuuksia. Tavoitteena voi olla myös saavuttaa useamman edellä mainitun ominaisuuden yhdistelmä. (Tunturi & Tunturi 1999, 8.)

4.1 Metalliset pinnoitteet

Metallinen pinnoitekerros voidaan tuottaa tuotteen päälle eri menetelmiä käyttäen. Yksinkertaisin tapa pinnoittaa metallia on kasta kylmä tuote sulaan pinnoitusmetalliin. Pinnoitettavan tuotteen pinnan tulee olla puhdas, jotta siihen saadaan tarttumaan peittävä kerros pinnoitusainetta. (Ihalainen, Aaltonen, Aromäki & Sihvonen 2005, 394.)

Elektrolyttisesti pinnoittamalla voidaan valmistaa paljon erilaisia metallisia peitekerroksia. Oikeanlaisella menetelmällä voidaan pinnoittaa myös muoviesineitä metallipinnoitteella. Pinta voidaan viimeistellä myös elektrolyttisellä kiillotuksella, jossa metallipinnasta poistetaan ainetta elektrolyttisesti ja pysyvää heijastuskykyä tavoiteltaessa passivoidaan kiillotettu pinta kemiallisesti. (Ihalainen ym. 2005, 394.)

Höyrystyspinnoitus on kolmas pinnoitusperiaate. Nämä toteutetaan kemiallisen reaktion ja fysikaalisen tapahtuman avulla määrätyissä olosuhteissa kappaleen pintaan, johon muodostuu yleensä nitridi- tai karbidiyhdiste lujittamaan ja liukastamaan pintaa. (Ihalainen ym. 2005, 394.)

Metalliruiskutuksella voidaan päällystää myös metallikappaleita. Tällöin kiinnitystapa perustuu adheesioon kuten kastopinnoituksessakin. (Ihalainen ym. 2005, 394.)

4.2 Diffuusiopinnoitteet

Diffuusiopinnoitteilla ja -pintakäsittelyillä pyritään muuttamaan teräspintojen ominaisuuksia haluttuun suuntaan. Pinnoitteen avulla voidaan esim. parantaa pinnan korroosionkestävyyttä, kulutuskestävyyttä, kitkaominaisuuksia ja hapettumiskestävyyttä. Kulumiskestävyyttä parannetaan usein keraamisilla pinnoitteilla, jotka ovat jonkin metallin ja epämetallin yhdisteitä. Diffuusiomenetelmiä käytetään, koska niillä voidaan saavuttaa pinnoitteiden erinomainen kiinnipysyvyys ja hyvät pinnoitteen ominaisuudet. Diffuusiopinnoituksia ovat mm. nitraus, booraus, TD -menetelmä, ioni-istutus ja diffuusiokromaus. (Tunturi & Tunturi 1999, 107–112.)

Booraus on termokemiallinen käsittely, jossa metallin pintaan muodostuu kova boridikerros. Käsittely voidaan suorittaa jauheessa, kaasussa, pastassa tai suolakylvyssä. Boorauslämpötila on 800 – 1050 °C ja käsittelyaika vaihtelee yhdestä kuuteen tuntiin. Käsittelyllä saavutettava kovuus vaihtelee välillä 1200 – 2000 HV. (Tunturi & Tunturi 1999, 109.)

TD-menetelmä eli Toyota Diffusion –menetelmä on japanilainen karbidipinnoitusmenetelmä, jonka käyttö on nopeassa kasvussa pääasiallisesti autoteollisuudessa. Pinnoitusmenetelmää mainostetaan maailman yksinkertaisimmaksi ja käytännöllisimmäksi karbidipinnoitusmenetelmäksi. TD-menetelmässä pinnoitettavat kappaleet upotetaan sulaan booraksiin, joka sisältää karbideja muodostavia aineita. Karbidipinnoite muodostuu kappaleen perusmetallissa olevan hiilen diffundoituessa kappaleen pinnalle ja reagoiessa kylvyssä olevien karbidinmuodostajien kanssa. Kylvyn lämpötila valitaan vastaamaan perusmateriaalin austenointilämpötilaa väliltä 800 – 1200 °C. Pinnoitusaika vaihtelee tavallisesti viidestä kymmeneen tuntiin ja menetelmällä saavutetaan tyypillisesti pinnoitteen kovuus väliltä 3000 – 4000 HV. (Tunturi & Tunturi 1999, 111.)

Ioni-istutuksessa kappaleen pintaan seostettava aine kiihdytetään sähkökentän avulla noin 10^{-5} mbar:n alipaineessa ja ammutaan ionisoituneena käsiteltävän kappaleen pintakerrokseen. Menetelmällä voidaan käsitellä kaikkia teräksiä ja niiden pintaan voidaan lisätä haluttu määrä mitä tahansa seosaineita. Käsittelylämpötila voi olla käytännössä kuinka alhainen tahansa. Menetelmällä ei saada aikaan varsinaista pinnoitkerrosta, vaan ionit tunkeutuvat perusmateriaalin pintakerrokseen, jolloin pintaan muodostuu puristusjännityksiä ja pinnan kovuus kasvaa. Saavutettava pinnan kovuus

riippuu käytetyistä prosessimuuttujista, joten kovuuden numeroarvojen antaminen on vaikeaa. (Tunturi & Tunturi 1999, 112.)

Diffuusiokromauksella teräksen pintaan saadaan kulumiskestävyyttä parantavia kromikarbideja. Diffuusiokromaus voidaan tehdä eri tavoin kaasussa tai jauheessa. Käsiteltävän materiaalin hiilipitoisuuden tulee olla yli 0,3 %. Pintaan muodostuvan kromikarbidikerroksen paksuus on 5 – 20 µm, ja sen kovuus perusaineen hiilipitoisuudesta riippuen 1500 – 2000 HV. (Tunturi & Tunturi 1999, 113.)

4.3 Kovakromaus

Kovakromaus, toiselta nimeltään tekninen kromaus, on elektrolyyttinen pinnoitusmenetelmä. Kromipinnoitteet jaotellaan kahteen eri luokkaan: kovakromaukseen ja kiiltokromaukseen. Kyseessä on kovakromaus, kun pinnoitepaksuus ylittää arvon 0,8 µm. (Schlesinger & Paunovic 2000, 289.) Kovakromattu pinta on kiiltokromattua pintaa mattaisempi, joskin molemmissa pinta on kirkas ja heijastava.

Kovakromausta on käytetty pitkään parantamaan koneenosien kulutuskestävyyttä, kitkaominaisuuksia ja korroosionkestoa ulkonäköseikkojen jäädessä toissijaisiksi. Yleensä koneenosien päälle pinnoitettu kovakromikerros on paksuudeltaan yli 10 µm. Tämä pinnoitepaksuus ei kuitenkaan tarjoa kovin hyvää kulumiskestävyyttä, vaan sen tulee olla 60 – 120 µm, mikäli halutaan saavuttaa suuri kulumiskestävyys. (SFS-EN ISO 6158 2005, 22.) Käyttökohteen vaatiessa esimerkiksi tehtäessä korjauspinnoituksia voi kromipinnoitteen paksuus olla jopa satoja mikrometrejä. (Komusaari & Suosalmi 2003, 82.)

Kovakromauksella saadaan pinnoitettavalle kappaleelle kova ja liukas pinta, joka kestää hyvin kulutusta ja korroosiota. Sitä käytetään tavallisimpien metallien ja metalliseosten pinnoitteeksi. Teollisuudessa kovakromausta käytetään koneenosiin ja koneistusvirheiden korjaamiseen. Kovakromin tärkeimpiä ominaisuuksia ovat kovuus ja kulumiskestävyys, mikä johtuu suuren mikrokovuuden ja hyvien kitkaominaisuuksien lisäksi myös kromipinnan kyvystä muodostaa uusiutuva oksidikerros, joka taas vähentää kontaktipintojen välillä tapahtuu adhesiivista kulumista. (Holmberg & Matthews 1994, 171; Kivioja, Kivivuori & Salonen 2010, 202.) Kovuus vaihtelee pinnoitusprosessin mukaan 600 - 1100 HV. Pinnoitteen korkea kovuus ei välttämättä merkitse

hyvää kulumiskestävyyttä, sillä tutkimusten mukaan kromipinnoitteiden kulumiskestävyys on parhaimmillaan kovuuden ollessa n. 900 HV. Pinnoitteen optimiarvoksi esitetään kovuutta 900 HV. Kromipinnoitetta saostettaessa syntyy pinnoitteeseen mikrohalkeamia. Kovakromin ominaisuudet määräytyvätkin muodostuneen mikrorakenteen mukaan (taulukko 1). (Tunturi & Tunturi 1999, 50–51.)

TAULUKKO 1. Kovakromin ominaisuudet määräytyvät muodostuneen mikrorakenteen mukaan (Tunturi & Tunturi 1999, 51.)

Halkeillut kovakromi	Kun pinnoitepaksuus ylittää 2 µm, siihen muodostuu lähes poikkeuksetta halkeamaverkosto. Mikäli halkeamia on alle 250 kpl/cm, on kyseessä makrohalkeillut kromi, jos yli 250 kpl/cm, kyseessä on mikrohalkeillut kromi. Pinnoitetun kappaleen kulu- ja korroosionkestokyky on sitä parempi, mitä tiheämpi on kovakromipinnoitteen halkeamaverkosto.
Kaksoiskerros-kovakromi	Kaksoiskerros-kovakromirakenne koostuu halkeilemattomasta kromista, jonka päälle on saostettu tavallista kromia. Sen kovuus on sama kuin tavallisen kromin, mutta korroosionkestävyys on tätä parempi.
Huokoinen kovakromi	Huokoinen kovakromi valmistetaan joko kemiallisella, sähkökemiallisella tai mekaanisella käsittelyllä. Näitä pinnoitteita käytetään voitelupinnoitteina, sillä huokokset toimivat voiteluaineverastona esim. sylintereissä.
Halkeilematon kovakromi	Halkeilematon kovakromi erona tavalliseen kromiin on, ettei se ole yhtä kova ja hauras. Korroosionkesto on parempi kuin tavallisella kromilla.

Kovakromipinnoitteen voidaan sanoa olevan edullinen pinnoite verrattuna sen kustannuksiin siitä saatavaan hyötyyn. Se saostetaan pinnoitettavan kappaleen päälle ja pinnoitepaksuus sillä on käyttötarkoituksen mukaan 5 – 500 µm, tavallisesti 30 – 50 µm. Pinnoitteen avulla voidaan saavuttaa jopa 8 – 10 kertaa parempi kulumiskestävyys pinnoittamattomaan materiaaliin verrattaessa. Yleisimpiä käyttökohteita ovat mm. akselit, karat, sylinterit, männät, liukupinnat ja alamittaan työstetyt osat. Kovakromin etuna on helposti uusittava pinnoite. Kaikki tavalliset rakenneteräkset soveltuvat kromaukseen, kuten myös useimmat työkaluteräkset ja kupari-, nikkeli- ja alumiiniseokset. Kromikylvyn huonon levityskyvyn vuoksi on monimutkaisten kappaleiden pinnoittaminen hankalaa. Altainen koko rajoittaa myös pinnoitettavien kappaleiden

den kokoa ja myös pienten alueiden pinnoittaminen on hankalaa. (Tunturi & Tunturi 1999, 50–52.)

4.4 Kemiallinen nikkelöinti

Kemiallisessa nikkelöinnissä eli autokatalyyttisessä nikkelöinnissä pinnoitteen pelkistäminen kappaleen pintaan tapahtuu ilman ulkoista virtalähdettä, eli kyseessä on kemiallinen reaktio. Kemiallisella nikkelillä saadaan pinnoitteesta todella tasainen ja mittatarkka riippumatta pinnoitettavan kappaleen muodosta. Kemiallista nikkelöintiä käytetäänkin monesti, kun pinnoitteelta vaaditaan tasaista kerrospaksuutta, kovuutta, kulutuskestävyyttä, korroosionkestoa, alhaista kitkakerrointa ja voiteluominaisuuksia. Sitä käytetäänkin moniin vaativiin käyttökohteisiin, kuten monimutkaisten kappaleiden käsittelyyn hyvän levityskykynsä ansiosta. Sitä voidaan käyttää myös kuluneiden tai ylityöstettyjen kappaleiden kunnostamiseen. Pinnoite soveltuu hyvin alumiinille, teräkselle, messingille ja kuparille. Kemiallisesti voidaan saostaa myös seos- ja komposiittipinnoitteita. Tulee kuitenkin ottaa huomioon prosessin taloudellinen puoli, sillä kemiallisella nikkelillä pinnoittaminen on huomattavasti kalliimpi kuin vastaava sähkösaostettu pinnoite. Taulukossa 2 on esitelty kemiallisen nikkelin ominaisuuksia ja käyttöesimerkkejä. (Tunturi & Tunturi 1999, 56.)

TAULUKKO 2. Kemiallisten nikkelpinnoitteiden ominaisuuksia ja käyttöesimerkkejä (Tunturi & Tunturi 1999, 57.)

Ominaisuus	Käyttöesimerkkejä
Lujuus	Hammaspyörät, venttiilit
Korroosionkesto	Syöttöruuvit, kulmikkaat kappaleet, öljysuuttimet
Kulumiskestävyys	Painevalssi, erilaiset autonomat, kampiakselin kappaleet, moottoripyöränketju
Voiteluominaisuudet	Työkalut muoviteollisuudessa, valumuotit
Tasapaksu saostus	Kappaleet, joilla monimutkainen muoto ja joihin syntyy vaihtelevia kerrospaksuuksia elektrolyttisessä pinnoituksessa
Juotettavuus	Alumiinikappaleet, joilla monimutkainen muoto

Pinnoitteella saavutetaan hyvä korroosionkestävyys, pinnoitepaksuuden ollessa yli 25 µm. Kemiallinen nikkelöinti voidaan suorittaa kahdella eri pelkistimellä, joko fosforilla tai boorilla. Käytettäessä fosforia pitoisuus vaihtelee 2 – 15 % välillä riippuen kylpytyypistä. Fosforipitoisuudella on suuri vaikutus pinnoitteen ominaisuuksiin. Lämpökäsittelyn avulla pystytään lisäämään pinnoitteen kovuutta ja kulutuksenkestoa sekä parannetaan pinnoitteen adheesiota eli kiinnipysyvyyttä. Lämpökäsittelmällä näitä pinnoitteita saadaan aikaan erkautumiskarkeneminen ja nikkelipinnoitteen kovuus voi kasvaa fosforipitoisuudesta ja lämpötilasta riippuen jopa 1100 HV:een, mikä vastaa kovakromipinnoitteen kovuutta. Boorihydridikylpyjen pH on hypofosfiittikylpyjen pH:ta korkeampi. Pinnoitteet sisältävät tavallisesti noin 3 – 8 % booria ja ne ovat lämpökäsittelmättömänä kovempia kuin hypofosfiittikylvyillä saadut pinnoitteet. (Tunturi & Tunturi 1999, 56.)

4.5 Typetys

Typetys, eli nitraus on kemiallinen prosessi, jossa käsiteltävää kappaletta hehkutetaan tarkoin säädetyssä kaasuatmosfäärissä. Toisin sanoen käsittelyssä teräskappaleen pintaan johdetaan typpeä niin matalassa lämpötilassa, ettei käsiteltävään kappaleeseen synny mittamuutoksia käsittelyn aikana. Käsittely tapahtuu yleensä 450 – 590 °C lämpötilassa ja kestää 6 – 70 h. (Kaarinan Karkaisutyöt Oy 2012.)

Typetys on yleistynyt viime vuosien aikana pintakarkaisumenetelmien ja kovakromauksen kustannuksella. Menestyksen vuoksi on metalliteollisuus kehittänyt erityisesti typetykseen sopivia menetelmiä. (Bodycote Lämpökäsittely Oy 2007.)

Typetysmenetelmiä ovat esimerkiksi kaasutypetys, plasmatypetys, hiilitypetys ja alipainetypetys. Pinta voidaan näiden jälkeen vielä hapettaa (mustanitraus), jolloin saavutetaan typetystä paremmat liukuominaisuudet ja korroosionkestävyys. Hiilitypetyksessä (lyhyt nitraus) kappaleen pintaan lisätään typen lisäksi hiiltä. Typetyksessä käsittelyn avulla saavutetaan kappaleeseen 0,1 – 0,8 mm syvyys ja 500 – 1200 HV 0,1 kovuus. Mitä syvemmälle typetyksen vaikutuksen halutaan ulottuvan, sitä kauemmin on kappaletta pidettävä typetysuunissa. Typetysajat voivat vaihdella muutamasta tunnista aina lähes sataan tuntiin saakka. (Tunturi & Tunturi 1999, 107–109.)

Typetyksen tarkoituksena on erilaisten nitridien muodostaminen kappaleen pintakerrokseen. Typetetyn kappaleen pintapaineen kestävyys on kohtalainen, pinnan liukuminaisuudet erinomaiset ja pinnan taivutusväsymislujuus hyvä. Nitridejä muodostavana kaasuna käytetään ammoniakkia. Mikäli halutaan saavuttaa paksumpi kerros lyhyemmällä ajalla, lisätään prosessiin hiilidioksidia. Musta pinta saavutetaan hapettamalla teräksen pintaa 450 – 550 °C lämpötilassa ennen kappaleen jäähdystä. Tuloksena saadaan musta ja tiivis oksidikerros, joka on paksuudeltaan noin 40 µm. Uloimmaksi pintaan muodostuu erittäin kova ja ohut yhdistekerros ja sen alle diffuusiokerros, joka parantaa väsymislujutta. (Kaarinan Karkaisutyöt Oy 2012.)

Typetys parantaa mm. seuraavia ominaisuuksia: kovuus, kulumiskestävyys, väsymislujuus ja korroosionkestävyys. Sen käyttökohteita ovat mm. akselit, ruuvit, liukupinnat ja hammaspyörät. Korroosionkestävyys paranee huomattavasti typetyksen jälkeisellä hapetuksella. Ruostumattomilla teräksillä korroosionkestävyys saattaa kuitenkin heiketä typetyksessä. Koska typetyksessä ei tapahdu karkenemisreaktiota, ovat mittamuutokset pieniä. Lastuavasta työstöstä syntyneet jäännösjännitykset saattavat kuitenkin laueta typetyslämpötiloissa aiheuttaen muodonmuutoksia, mitkä voidaan kuitenkin estää tekemällä jännityksenpoistohehkus sopivassa työvaiheessa. (Kivioja, Kivivuori & Salonen 2010, 197–198.)

5 PINNOITTEIDEN TRIBOLOGIA

Terminä tribologia esiintyi ensimmäistä kertaa julkisuudessa vuonna 1966 englantilaisen opetus- ja tiedeministeriön perustaman komitean (Jost'in komitea) raportissa. Sana tribologia tulee kreikankielisestä sanasta *tribos*, mikä tarkoittaa hankaamista. Tarkasteltaessa koneenosien kitkaa, kulumista ja voitelua, on tribologia erittäin tärkeä käsite. Vaikkakin tribologia on varsin nuori tekniikan ala, on syytä muistaa, että sen osa-alueita (esim. kitka ja kuluminen) on tutkittu jo paljon aikaisemmin. (Kivioja ym. 2010, 11.)

1970-luvun loppupuolella perustettu Suomen tribologiayhdistys on määritellyt tribologian seuraavasti: "Tribologia on tieteenala, joka käsittelee toisiinsa nähden liikkuvien pintojen vuorovaikutuksia ja niihin liittyvää teknologiaa eli pääasiassa kitkaan, kulumiseen ja voiteluun liittyviä ilmiöitä." (Aho 1993, 7.) OECD (engl. Organisation for Economic Cooperation and Development) on hyväksynyt seuraavan tavan määritellä tribologia: "*Tribology is the science and technology of surfaces acting upon one another in relative movement and of the problems associated therewith*". (Kivioja ym. 2010, 11.)

Tribologiasta on syntynyt oma tieteenalansa sen avulla saavutettavan suuren taloudellisen hyödyn vuoksi ja koska sen aluepiiriin kuuluvien ongelmien ratkaisuun tarvitaan monien eri alojen tuntemusta. Saksalaisen BHFT:n raportin mukaan kitkan, korroosion ja kulumisen aiheuttamat tappiot ovat n. 4,5 % teollisuusmaiden bruttokansantuotteesta. Tribologian ymmärtämiseen tarvitaan koneopin, materiaaliopin, fysiikan ja kemian tuntemusta. Tribologian voidaankin sanoa yhdistävän fysiikan, kemian, materiaaliopin, koneopin ja tuotekehityksen omaksi insinööritieteekseen. (Kivioja ym. 2010, 11.)

Oikeanlaisella tribologisella suunnittelulla tai hyvällä tribologisella käytännöllä tarkoitetaan menettelytapoja, joissa kulumisen ja kitkan haittavaikutukset pidetään mahdollisimman pieninä joko voitelua käyttäen tai ilman. Joissakin tapauksissa taasen pyritään mahdollisimman suureen kitkakertoimeen ja samanaikaisesti pieneen kulumiseen (esim. kiskon ja junapyörän kosketus). Hallittu kuluminen pyritään saavuttamaan hionnassa ja kiillottamisessa. Tribologisia kosketuksia syntyy, kun kappaleen liikerataa ohjataan mekaanisesti (laakeroinnit), siirretään voimaa kappaleesta toiseen (hammaspyörät), tai muutetaan kappaleen muotoa (rullamuovaus). (Sundquist 1986, 11–14.)

Vuorovaikutuksen välisiä osatekijöitä tribologisissa tilanteissa ovat

- pintojen välillä vaikuttavat voimat
- energiankulutus
- muutokset materiaalin fysikaalisissa ja kemiallisissa ominaisuuksissa
- pintojen topografiset muutokset
- irtoavien kulumishiukkasten syntyminen, muokkautuminen ja poistuminen tai jääminen pintojen väliin. (Aho 1993, 7–8.)

Pintojen vuorovaikutuksen luonteeseen ja seurauksiin vaikuttavat toiminnassa olevien materiaalien kitka- ja kulumiskäyttäytyminen. Tribologian tärkein tehtävä on pyrkiä ymmärtämään kosketuspintojen vuorovaikutusten luonnetta ja ratkaista teknologiset ongelmat, jotka liittyvät näiden toisiaan koskettavien pintojen vuorovaikutukseen. Ratkottaessa alan teknologisia ongelmia on välttämätöntä ymmärtää ja ottaa huomioon kolme tribologiaan kuuluvaa tärkeää asiaa

- koskettavien pintojen väliset vuorovaikutukset
- ulkoisten voimien vaikutus pintojen kosketuskohdassa ja sen lähellä olevan materiaalin mahdollisiin muodonmuutoksiin
- ympäristön ja pintojen väliaineiden fysikaaliskemialliset vaikutukset pintojen ominaisuuksiin.

Nämä tribologisessa tilanteessa olevat tekijät ovat vuorovaikutuksessa keskenään, joten jonkin tekijän unohtaminen johtaa virheellisiin johtopäätöksiin. (Aho 1993, 7–8.)

Voimien siirroista aiheutuu pintoihin makroskooppisia muodonmuutoksia, jotka synnyttävät uutta, voimakkaasti reagoivaa pintaa. Samalla irtoaa kulumishiukkasia ja syntyy uusia kohoumia kappaleen pintaan. Voiteluaineiden ja kaasumaisten elementtien fysikaaliset ja kemialliset vaikutukset vastinpintojen materiaaleihin voivat muodostaa yhdisteitä ja muuttaa siten pintojen ominaisuuksia. Vaikutus on joko positiivinen tai negatiivinen sekä kulumisen että kitkavoiman kannalta. Tribologisessa tilanteessa vaikuttavat ulkopuoliset tekijät ovat:

- toimiviin pintoihin ympäristöstä suuntautuvat kemialliset ja fyysiset vaikutukset
- pintoihin suuntautuvat voimavaikutukset
- kosketuspaineiden vaikutus pintamateriaaleihin. (Aho 1993, 7–8.)

5.1 Kuluminen

Kuluminen on tapahtuma, jossa syntyy materiaalihäviötä toisiaan vasten puristuvien kappaleiden keskinäisessä vuorovaikutuksessa. Yleensä kulumista mitataan suhteellisenä arvona, jossa kulunut materiaalilavuus suhteutetaan liukumismatkaan (yhtälö 5.1). Kulumisessa on kaksi tyypillistä vaihetta: sisäänajokuluminen ja tasainen kuluminen. Liikkeen alussa eli sisäänajovaiheessa kuluminen on voimakasta ja kulumiskäyrä nousee voimakkaasti. Kun kuluminen saavuttaa pisteen, jossa kosketuspintojen pinnankarheudet ovat tasoittuneet ja epäpuhtaudet poistuneet kosketuskohdasta, on saavutettu tasapainotila. Tämän jälkeen kulumiskäyrä on suora, eli kuluminen on tasaista. (Kivioja ym. 2010, 102.)

Seuraavan kaavan avulla saadaan selville kulunut tilavuus

$$\frac{V}{s} = Z \frac{F_N}{H} \quad 5.1$$

jossa

- H on materiaalin kovuus ja
- Z on verrannollisuuskerroin (kulumiskerroin)
- F_N on normaalivoima
- V on tilavuus
- s on matka

Ajan kuluessa kuluminen johtaa koneenoson tai työkalun toimintakyvyn heikkenemiseen, joka saattaa aiheuttaa osan tai laitteen varioitumisen. Kohteittain sallittu kuluminen on hyvin erilaista. Esimerkiksi sylinterivarsien laakeripinnoilla jo pienikin kuluminen saattaa aiheuttaa toimintahäiriön, kun taas lumiauran terissä kulumisen täytyy olla suurta, ennen kuin sillä on vaikutusta laitteen toimivuuteen. Materiaalin kulumiseen vaikuttaa ratkaisevasti kuluvan ja kuluttavan pintojen keskinäisen vaikutuksen välinen luonne, materiaaliominaisuudet ja vallitsevat olosuhteet. Näistä tekijöistä muodostuu kulumiseen vaikuttava tribologinen systeemi, joka määrää kulumismekanismiin, jolla materiaali irtoaa pinnalta. (Koivisto, Laitinen, Niinimäki, Tiainen, Tiilikka, & Tuomikoski 2006, 27–28.)

5.1.1 Kulumistyyppit ja kulumisen lajittelu liikkeen mukaan

Kulumista tapahtuu monissa kovin erilaisissa olosuhteissa. Kuluminen lajitellaan eri kulutusmekanismeihin, jotka voivat toimia joko yksin tai yhdessä. Kuluminen voi tapahtua yhtäaikaaisesti usealla eri mekanismilla, joista yhden katsotaan olevan hallitseva mekanismi tietyssä kosketuksessa. Mikäli kyseinen mekanismi aiheuttaa käytössä voimakasta kulumista, pyritään tätä pienentämään olosuhteita muuttamalla. Tällöin käy usein niin, että toinen mekanismi tulee vallitsevaksi. (Kivioja ym. 2010, 100.)

Kulumista on yritetty luokitella monin eri perustein, ja onkin syntynyt ongelmia luokitella kuluminen oikein. Koneenrakennuksessa puhutaan usein kuoppautumisesta, väsymiskulumisesta, naarmuuntumisesta, kitkakulumisesta jne. aina sen mukaan, mitä pintavaurioita tai fyysikaalista tapahtumaa halutaan korostaa. Kuluminen jaotellaan kahteen päätyyppiin seuraavasti:

- luokittelu kulumista aiheuttavan suhteellisen liikkeen pohjalta ja
- kulumismekanismien pohjalta. (Kivioja ym. 2010, 100.)

Luokiteltaessa kulumisen suhteellinen liikkeen pohjalta voidaan kulumista aiheuttavat liiketyypit jakaa kuuteen erilaiseen tapaukseen:

- liukuminen
- vierintä
- iskukuormitus
- värähtely
- nestevirtaus
- nestevirtaus, jossa kiinteitä partikkeleita. (Kivioja ym. 2010, 100.)

Vierivän kosketukseen yhteydessä tapahtuu usein myös liukumista. Tällaisissa tapauksissa suurin osa kulumisista tapahtuu liukumisen puolella ja vierinnästä aiheutuva kuluminen on minimaalista, mikäli voitelu ei estä metallipintojen välistä kosketusta. Vierivässä kosketuksessa kuluminen tapahtuu yleensä metallin siirron avulla. Vierinnän alkaessa peittyä kovempi pinta pehmeämmän materiaalin adheesio seurauksena. Voidaan puhua myös pinnan valssautumisesta toiselle pinnalle. Kappaleiden ollessa normaalissa atmosfäärissä siirtynyt kerros yleensä hapettuu ja irtoaa muodostaen kulumispartikkeleita. Kulumistuote voi myös syntyä muokkauksesta johtuvan haurastumisen ja murtumisen seurauksena. (Kivioja ym. 2010, 179–186; Sundquist 1986, 114–120.)

Erotettaessa vierivän kosketuksen pinnat toisistaan voiteluainekalvolla ei pääasiallinen kulutusmekanismi ole adhesiivinen, abrasiivinen tai tribokemiallinen, vaan vallitseva mekanismi on väsyminen eli tässä tapauksessa vierintäväsyminen. Vierintäväsyminen on seurausta toistuvista kuormituskerroista ja sitä myötä jännitystä aiheuttavista väsymismurtumista. (Kivioja ym. 2010, 179–186; Sundquist 1986, 114–120.)

Iskukulumisessa muodostuu pintaan jännityskenttä lyhyemmässä ajassa kuin vierintäkosketuksessa ja kulumiseen liittyy aina plastista muodonmuutosta. Mekaanisen impulssin vaikutuksesta iskukohtaan syntyy paikallinen plastinen muodonmuutos, josta seuraa kosketuskohtien materiaalin muuttuminen ja sitä myötä syntyy särö, joka aktivoi kulumista. Tapahtuman nopeuden vuoksi on koskettavien materiaalien visko-plastisilla ja viskoelastisilla ominaisuuksilla suuri merkitys iskukulumiskestävyteen. Paikallisesti esiintyy myös suurta lämmön nousua, koska lämpö ei ehdi poistua iskun aikana kosketuskohdasta. (Kivioja ym. 2010, 179–186; Sundquist 1986, 114–120.)

Värähtelykulumisen edellytyksenä on vastakkaisten pintojen välillä oleva edestakainen liike normaalivoiman alaisena. Tyypillisesti värähtelykulumista on mm. pulteissa, kiila- ja puristusliitoksissa, jotka usein ovat alttiita värähtelykuormitukselle. Värähtelykulumisen tapahtuu periaatteessa neljässä vaiheessa.

1. Normaalivoiman seurauksena pinnankarheuden huippujen välille syntyy adhesiivisia liitoksia, jotka repeytyvät irti värähtelyn seurauksena ja syntyy kulumispartikkeleita.
2. Kulumispartikkelit ovat muokkauslujittuneita ja muodostuessaan lämmentyneitä sekä pinnaltaan hapettuneita.
3. Kohdat, joihin muodostuu ensin abrasiivisia partikkeleita, kuluvat ympäristöön nopeammin edestakaisen liikkeen alaisena. Partikkelit leviävät uusiin kohtiin kuluneen kohdan reunoilta ja alkuperäisen keskelle muodostuu kovin paine.
4. Alkuperäinen kulumiskohta muodostuu suurimman paineen alaisena puolipallon muotoiseksi kuopaksi ja sen ulkopuolelle joutuvat partikkelit muodostavat uusia kulumiskohtia. (Kivioja ym. 2010, 179–186; Sundquist 1986, 114–120.)

Lopulta pintakerrokseen muodostuu syviä lovia, jonka seurauksena koneenosien lujuus pienenee. Ilmankosteuden lisääntyessä hapettuvat partikkelit nopeammin eli kosteuden kasvaessa herkkyys värähtelykulumiselle vähenee. (Kivioja ym. 2010, 179–186; Sundquist 1986, 114–120.)

Eroosio tai eroosiokuluminen on kulumisen prosessi, jossa metallia poistuu pintakerroksesta kiinteiden tai nestemäisten partikkeleiden törmäyksen seurauksena. Eroosiota voidaan käyttää hyväksi kiekko- ja kuulapuhalluksessa, esim. valutuotteiden puhdistuksessa. Haitallisena sitä esiintyy mm. prosessiteollisuuden kiinteän materiaalin kuljetuslinjastoissa, tulipesissä ja turbiineissa. (Kivioja ym. 2010, 179–186; Sundquist 1986, 114–120.)

Eroosiossa kulumisnopeus riippuu kulmasta, jossa kuluttavat partikkelit iskeytyvät materiaaliin. Sitkeät materiaalit muokkautuvat ja voivat muokkauslujittua partikkelien iskiessä niihin kohtisuoraan. Tällöin kuluminen on hidasta ja vallitsevana mekanismina on väsymiskuluminen. Partikkelien iskeytyessä pintaan vinosti kuluttavat ne sitkeätä materiaalia leikkaavasti ja kulumisnopeus on suurimmillaan tulokulman ollessa 20°. Hauraitten materiaalien kuluminen tapahtuu haurasmurtumien myötä ja kuluminen on nopeinta suihkun suuntautuessa kohtisuoraan pintaa vasten. (Kivioja ym. 2010, 179–186; Sundquist 1986, 114–120.)

Metallipinnan ohi virtaavan nesteeseen paineen muututtua nesteessä olevat kaasukuplat luhistuvat, jonka seurauksena metallipintaan kohdistuu paineiskuja aiheuttaen kavitaatiokulumista. Sitä voi esiintyä esimerkiksi laivan potkureissa ja osassa sen öljyllä voidelluissa laakereissa. Nesteessä olevien kaasukuplien stabiilisuus riippuu paineeroista kuplan sisä- ja ulkopuolella sekä kuplan pintaenergiasta. Kuplan luhistuessa vapautuu energiamäärä, joka vastaa sen pintaenergiaa, ja aiheuttaa näin metallipinnan kulumista. Tämän seurauksena metallipinnasta muodostuu yleensä hyvin rosoinen. Pienentämällä (vähentämällä) nesteeseen pintavoimien vaikutusta voidaan estää kavitaatiota. (Kivioja ym. 2010, 179–186; Sundquist 1986, 114–120.)

5.1.2 Kulumismekanismit ja kulumismekanismien määrittäminen

Kulumismekanismeja ovat tartunta- eli adhesiivinen kuluminen, hionta- eli abrasiivinen kuluminen, tribokemiallinen kuluminen ja väsymiskuluminen (taulukko 3).

TAULUKKO 3. Tribologian sanastoa; kulumismekanismit (Kivioja ym. 2010, 104–113.)

Kulumismekanismi	Selitys
Adheesiokuluminen, tartuntakuluminen	Kuluminen, jossa toisiaan koskettavien materiaalien pinnat niin sanotusti hitsautuvat yhteen. Aiheutuu kun pinnankarheuden hetkelliset yhteentarttumat murtuvat ja irronnut materiaali siirtyy pinnasta toiseen. Adheesiokuluminen on yleensä seuraus lämpötilan äkillisestä nousemisesta.
Abraasiokuluminen, hiontakuluminen	Kuluminen, joka aiheutuu kun kovempi pinta liikkuu pehmeämpää pintaa vasten ja sen pinnankarheuden huiput pehmentävät normaalivoiman johdosta pehmeämmän kappaleen pintaa tai kovan irtohiukkasen liikkussa kahden pinnan välissä. Pinnankarheuden huiput tai irtohiukkanen tunkeutuu pehmeämpään pintaan ja irrottaa siitä materiaalia kyntämällä.
Tribokemiallinen kuluminen	Kuluminen, joka aiheutuu pintojen välisten aineiden reagoidessa kemiallisesti pintojen kanssa. Nämä aktivoituvat kitkan tuottamasta lämpötilan noususta. Kulumisen seurauksena pinta mahdollisesti kovettuu tai tuottaa kulumispartikkeleita jotka kiihdyttävät kulumisprosessia.
Väsymiskuluminen	Syntyminen vaatii tykyttävää tai vaihtuvaa pitempiaikaista rasitusta, joista aiheutuu materiaalin kulumispartikkelien syntyminen väsymismurtuman seurauksena. Väsymismurtuma lähtee liikkeelle murtumasäröstä, jonka välittömään läheisyyteen syntyy jatkuvan rasituksen seurauksena jännityskenttä ja murtuma etenee aikaansaaden lopulta partikkelin irtoamisen. (Sundquist 1986, 113.)

Teollisuuden kulutusvaurioiden syyt kulutusmekanismien kesken jakaantuvat seuraavasti:

- abrasiivinen kuluminen 55 %
- adhesiivinen kuluminen 15 %
- väsymiskuluminen 15 %
- tribokemiallinen kuluminen 15 %. (Tekninen Tiedotus 1/1986, 88.)

Lisäksi asiaa voi tarkastella lujuusopin kannalta, jolloin kulutustapahtumia voidaan tarkastella

- ulkoisten kuormien (esim. puristusjännitys, vetojännitys, taivutus, vääntö) tai
- tuhoutumismekanismien (esim. hauras murtuma, väsyminen) kannalta.

Tällöin ulkoisten kuormitusten vaikutus vastaa kulumisen päätyyppimääritelmän ensimmäistä kohtaa ja tuhoutumismekanismien tarkastelu toista kohtaa. (Sundquist 1986, 146.)

Materiaali irtoaminen kuluvalta pinnalta tapahtuu yleensä eri mekanismien vaikutuksesta. Yleensä voidaan määrittää tärkein kulutusmekanismi, johon tulee kiinnittää huomiota.

Kuluminen ei ole yksiselitteinen ilmiö, joten sitä ei voida määrittää yhdellä testillä kattavasti. Tämän vuoksi on kehitetty paljon erilaisia kulutustestejä erilaisiin olosuhteisiin. Kulumiskestävyyyteen vaikuttaa materiaalin, pinnan laadun ja mahdollisen väliaineen lisäksi myös olosuhteet, siksi kone tai laite olisi parasta testata todellisissa olosuhteissa. Kuitenkin testaus tapahtuu usein laboratoriossa jäljittelevän mallikokeen avulla, sen edullisuuden ja nopeuden vuoksi. Mallikokeen etuna verrattuna kenttäkokeeseen on lyhyempi koestusaika, mahdollisuus käyttää yksinkertaisia ja halpoja koekappaleita, sekä kulumismuuttujien ja -olosuhteiden hallitseminen ja muuttaminen on helppoa. Mallikokeen kulumisolosuhteet poikkeavat aina todellisista olosuhteista, on vaarana että laboratoriokokeissa olosuhteet ovat erilaiset kuin käytännön olosuhteissa. Tämä voitaisiin välttää tekemällä kenttä- ja laboratoriokokeita rinnan, jolloin voitaisiin varmistaa, että molemmissa tapauksissa kulumisen tunnusuurat, kulumisen määrä ja kuluvan pinnan ominaisuuksien muutokset ovat yhdenmukaisia. (Lämsä, Kiuru, Raahen Seudun Teknologiakeskus Oy & Oulun Yliopisto 2012.)

5.1.3 Kuluminen liukutilanteessa

Kuluminen liukutilanteessa johtuu muodonmuutoksista pinnankarheuden kohoumisesta, pintojen delaminaatiokulumisesta sekä pintojen naarmuuntumisesta, jonka ovat aiheuttaneet uudet kohoumat johtuen muokkauslujittuneista kulumishiukkasista ja pinnan muodonmuutoksista. (Aho 1993, 18.)

Plastinen muodonmuutos elastoplastisen materiaalin pintakerroksessa voi aiheuttaa onkaloiden muodostumista ja säröjen ydintymistä. Delaminaatiokuluminen on yleensä tärkein kulutusmekanismi. Se aiheutuu pinnanalaisista plastisista muodonmuutoksista johtuvista säröjen ydintymisistä ja etenemisestä. (Aho 1993, 18.)

Materiaalin kulumiseen vaikuttaa voimakkaasti kitkakerroin. Pintojen väliin jäävät kulumishiukkaset ovat suuri syy kitkan lisääntymiseen ja ne kiihdyttävätkin delaminaatioprosessia joka johtaa säröjen ydintymissyvyyden kasvamiseen. Kulumisnopeus voikin pienentyä jopa 2 – 3 kertaluokkaa, mikäli kitkakerroin voidaan pienentää puoleen. Kulumista voidaan pienentää poistamalla kulumishiukkaset hankausvälistä voitelun avulla. Mikrorakenteella määritetään materiaalin kovuus ja sitkeys, jotka taas vaikuttavat kulumisominaisuuksiin. Pinnan kovuus ja topografia vaikuttavat kosketavien pinnan kohoumien lukumäärään ja yksittäisten kosketuskohtien suuruuteen, sekä pintakerroksen muodonmuutosvastukseen. (Aho 1993, 18.)

5.2 Kitka

Kitka tunnetaan jokapäiväisenä ilmiönä, joka voimallaan vastustaa toisiaan vasten liukuvia kappaleita. Tilanne voidaan kuvata kahden voiman avulla, kitkavoimalla F_k ja normaalivoimalla F_n , jotka on esitetty yhtälössä 5.2. Koska kitkavoima pyrkii vastustamaan kappaleen liukumista, tarvitaan nopeuden \bar{v} ylläpitämiseksi samansuuruinen ulkoinen, mutta vastakkaismerkkinen voima F . (Sundquist 1986, 68–69.) Kitkakertoimella tarkoitetaan kitka- ja normaalivoiman välistä suhdetta, eli

$$\mu = \frac{F_k}{F_n} \qquad 5.2$$

On olemassa kaksi kitkavoimatyyppeä, lepo- ja liikekitka. Näistä lepokitka pyrkii vastustamaan liikkeelle lähtöä ja liikekitka pyrkii pysäyttämään jo alkaneen liikkeen. Toisin sanoen lepokitka on kappaleen liikkeelle saamiseen vaadittavan voiman vastavoima ja liikekitka vakionopeudella tapahtuvan liukumisen ylläpitämiseen tarvittavan voiman vastavoima. (Neale 2001, 550.) Kitkan haitat tiedostetaan yleensä hyvin ja niitä onkin pyritty vähentämään eri keinoin. Yksi tapa on käyttää materiaalipareja joiden välinen kitka on pieni tai voiteluaineita. Toinen tapa on liukuvan kosketuksen muuttaminen vieriväksi. (Sundquist 1986, 69.)

Materiaalin kitkakerroin ei ole muuttumaton vakio, vaan se voi riippua mm. kemiallisten ja fysikaalisten tekijöiden vaikutuksesta kosketuskohdassa, kulumishiukkasten vaikutuksesta tai muutoksista pintakerroksessa ja karheuskohoumissa. (Kivioja ym. 2010, 63.)

Tilanteesta riippuen saattaa kitkakerroin vaihdella $\mu = 0,001 \dots 2$. Kitkalla on olennainen vaikutus kitkahäviöihin, materiaalien ominaisuuksiin ja lämpenemiseen. Toisiinsa nähden liukuvien voitelemattomien metallipintojen välinen liukukitka aiheutuu:

- 1) Pintojen karheuskohoaminen
muodonmuutoksista $\mu_m = 0,43 \dots 0,75$
- 2) Kulumishiukkasten hankauksesta
ja siitä johtuvasta naarmuuntumisesta $\mu_n = 0 \dots 1,0$
 $\mu_n < 0,4$
- 3) Pintojen välisestä adheesiosta $\mu_a = 0 \dots 0,4$.

Edellä mainittujen osatekijöiden suhteellinen osuus vallitsevasta liukutilanteesta metallien kosketuskohdassa, johon puolestaan vaikuttavat käytettävä materiaalipari, aikaisempi liukumatka, pintojen topografia ja abrasiiviset hiukkaset pinnoilla, aikaisempi liukumatka, sekä ympäristö. Liukukuluminen yhteydessä tapahtuu pinnan alla plastisia muodonmuutoksia. Ne aiheuttavat kitkavastusta ja ovat näin suurin energiaa kuluttava tekijä. (Kivioja ym. 2010, 63.)

Voitelemattoman metallipinnan kitkatekijät:

- | | |
|--|--|
| 1) Pintojen karheuskohoaminen
muodonmuutokset | $\mu_m = 0,43 \dots 0,7$ |
| 2) Kulumishankaus ja siitä johtuva
naarmuuntuminen
Naarmuuntumisen aiheuttama kitkakerroin
μ_n on yleensä kuitenkin pienempi kuin 0,4 | $\mu_n = 0 \dots 1,0$ |
| 3) Pintojen välinen adheesio
Kokonaiskitkakertoimen vaihteluväli | $\mu_a = 0 \dots 0,4$
$\mu = 0,43 \dots 2.$ (Aho 1993, 15.) |

Kitkaan vaikuttavia parametreja ovat:

- normaalivoima ja sen jakauma pinnalle
- aikaisempi liukumatka
- pintojen topografia
- materiaalipari
- kulumishiukkaset pintojen välissä
- ympäristö (lämpötila, kaasut, nesteet, abrasiivit). (Aho 1993, 15.)

Muodonmuutos karheuskohoumissa vaikuttaa etupäässä lepokitkan suuruuteen. Liikkeen alettua muodonmuutoksen osuus liikekitkan muutokseen on vähäinen verrattuna naarmuuntumiseen ja adheesioon. (Aho 1993, 17.)

6 KOEJÄRJESTELYT

Levyille oli suunniteltava kiinnikkeet, jotta ne saatiin kiinni Pin On Disk -laitteeseen (kuva 3). Kiinnittimiä tuli olla kolme erilaista, 90° kulma, tasainen levy ja kaari. Laitteeseen oli jo valmiina tappi, jonka päässä oli Al_2O_3 -kuula, jonka avulla suoritettiin kulutuskokeet sylinteriin, joista mitattiin kulutusura. Kappaleet mallinnettiin Solid-Works -ohjelmalla ja valmistettiin Savonia-ammattikorkeakoulun tiloissa. Näiden erimuotoisten kiinnikkeiden tarkoitus oli saada erisuuruiset kulmat testattaville levyille. Tämä siksi, että saadaan mahdollisimman realistiset tulokset, sillä levy kulkee erilaisissa kulmissa Samesor Oy:n rullamuovauskoneissa.



KUVA 3. Kiinnikkeet Pin On Disk -laitteeseen (Sakari Tuovinen.)

6.1 Kokeiden kulku

Kokeet jaettiin esikokeisiin ja varsinaisiin kokeisiin. Esikokeissa Pin On Disk -laitteella tehtiin testejä, tarkoituksena oli löytää sopivat arvot varsinaisia kokeita varten. Varsinaisissa kokeissa käytettiin hyväksi esikokeissa saatuja tietoja materiaalien käyttäytymisestä ja sopivia testausarvoja Pin On Disk -laitteelle. Esikokeiden osuus kaikista kokeista oli melko vähäinen, sillä tarkoitus oli vain helpottaa varsinaisia kokeita löytämällä sopivat arvot.

6.1.1 Esikokeet

Aluksi oli löydettävä sopivat arvot (kierrosnopeus, massa, aika) joilla kappaleita alettaisiin testata. Tähän oli testattava monia kappaleita ja tutkittava eri arvojen muutta-

misen vaikutusta kappaleiden muutokseen. Kierrosnopeudeksi valittiin arvo, jolla levy kulkee Samesor Oy:n valmistamissa laitteissa. Massa valittiin sen perusteella, kuinka suuri pinta-ala levystä koskettaa pyörivään sauvaan. Näin saatiin testausaika sopivan mittaiseksi. Aika taasen valittiin näiden kahden edellä mainitun arvon valitsemisen jälkeen. Kun sopivat arvot oli löydetty, pystyttiin testaaminen aloittamaan varsinaisten kokeiden muodossa.

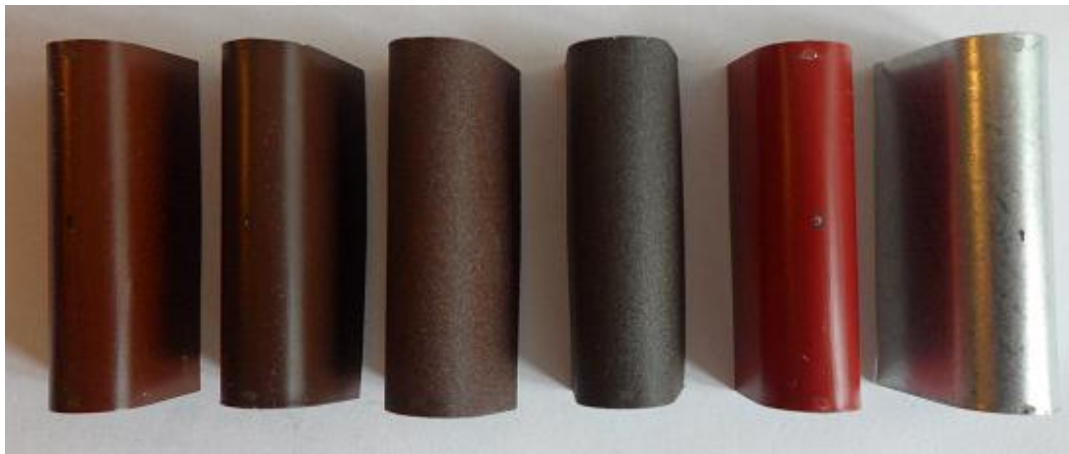
6.1.2 Varsinaiset kokeet

Esikokeita jouduttiin suorittamaan pelkästään Pin On Disk -laitteelle. Näiden esikokeiden tulosten perusteella pystyttiin aloittamaan varsinaiset Pin On Disk -kokeet, jotka oli myös suoritettava, ennen kuin kappaleille pystyttiin tekemään muita kokeita. Varsinaiset kokeet suoritettiin Pin On Disk -laitteella, kovuusmittarilla ja pinnankarheusmittarilla.

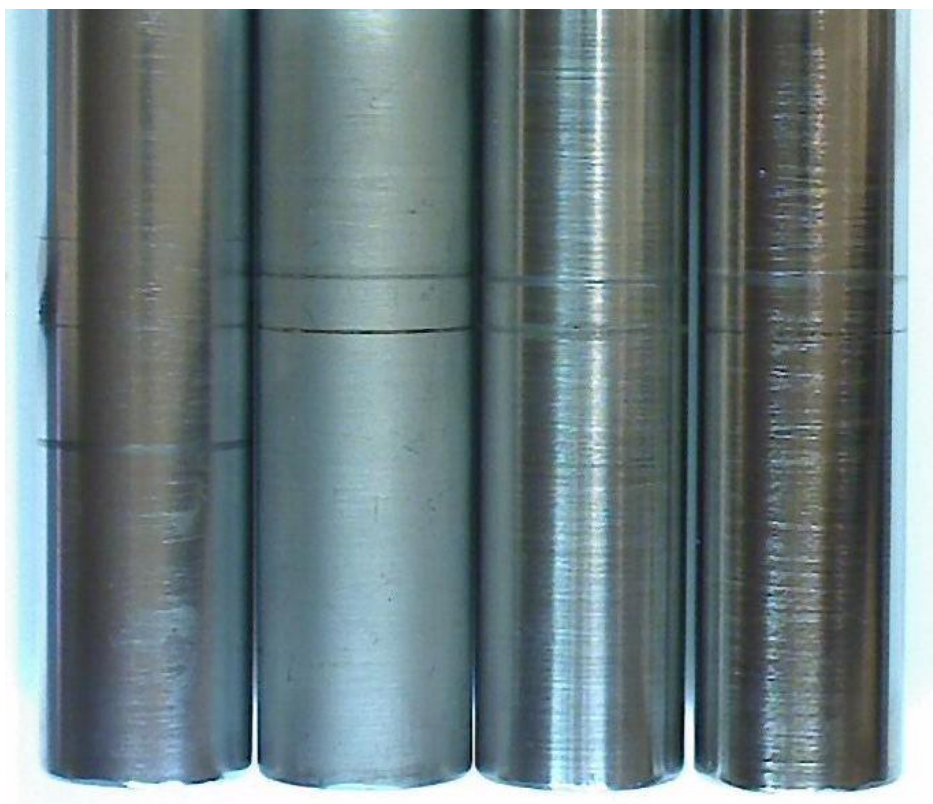
6.2 Pin On Disk -tappikulutuskone

Testaaminen aloitettiin kovakromatulla sauvalla, jonka vastinparit olivat viisi eri levyä kolmessa erilaisessa kiinnikkeessä. Jokaisesta testauksesta tallentui raportti tietokoneelle. Lisäksi tutkittavien kappaleiden tiedot ja käytettävät arvot kirjattiin paperille, jotka syötettiin Excel -ohjelmistoon tehtyyn mittauspöytäkirjaan. Ohjelma tallensi muistiin kitkavoiman ja kitkakertoimen määrän sekunnin välein ja lisäksi näistä muodostuvat keskiarvot. Lisäksi se tallensi testausajan, käytetyn painon ja kierrosnopeuden. Muut tiedot kirjattiin ylös ja syötettiin tietokoneelle.

Testattavia metallilevyjä oli yhteensä kuusi erilaista. Näissä viidessä oli maalipinta ja yksi oli galvanoitu. Pinnat erosivat toisistaan sekä värin, että karheuden perusteella. Maalatuista levyistä kolme oli sileäpintaista ja kaksi karheapintaista (kuva 4). Levyjä tuli testata neljällä erilaisella sauvalla, joissa oli kaikissa erilainen pinta. Ne olivat kovakromi, nitrattu, kemiallinen nikkeli ja käsittelemätön teräs (kuva 5). Pinnoitteet joita Samesor Oy käyttää rullamuovauskoneiden rullissa, ovat kovakromattu ja nitrattu.



KUVA 4. Kaarikiinnikkeellä testattuja peltilevyjä (Sakari Tuovinen.)



KUVA 5. Tutkitut sauvat: kovakromattu, nitrattu, pinnoittamaton ja kemiallisesti nikkeloity (Sakari Tuovinen.)

7 KOEKAPPALEIDEN TUTKIMUSMENETELMÄT

Koneenrakennuksessa joudutaan usein selvittämään laboratoriokokeiden avulla kahden toisiaan vasten liukuvan vastinparin välinen kitka ja kuluminen. Mikäli jokin teollinen sovellus halutaan simuloida laboratoriossa, on kokeet suunniteltava tarkkaan, jotta todellinen kosketustilanne (pinta-ala, kuormat, voitelu- ja ympäristöolosuhteet jne.) vastaa simulaatiota. Kirjallisuudesta saatavat kitkakertoimen lukuarvot on usein saavutettu absoluuttisissa olosuhteissa eivätkä siksi yleensä vastaa sovelluskohdetta. Onkin kehitetty erilaisia tribologisia standardikoelaitteita, joilla yksinkertaisten koejärjestelyjen avulla voidaan määrittää esim. kitkakerroin, kuluminen ja lämpöriippuvuudet. (Kivioja ym. 2010, 342.)

7.1 Pin on Disk -kulutus- ja kitkamittauskoe

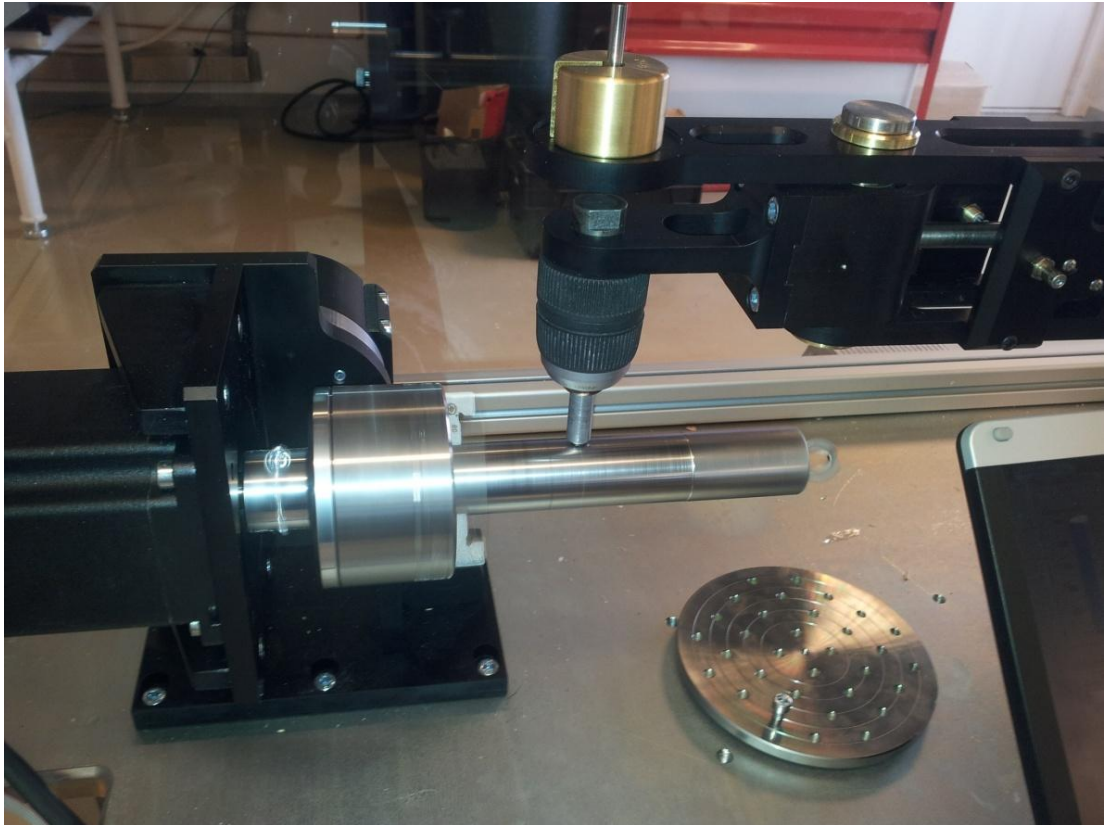
Tappikulutuskoneen eli Pin On Disk -koneen voidaan sanoa olevan yleisin tribologian tutkimuslaite. Laitteesta on olemassa erilaisia variaatioita, minkä vuoksi laitteiden nimiäkin on monenlaisia. Laitteen periaate kuitenkin on, että pyörivää levyä vasten painetaan joko kuulaa, sylinteriä tai tappia. Kuvassa 6 olevalla laitteella tehdyissä kokeissa pyörivää sylinteriä (metallisauva) vasten painetaan joko istukkaan kiinnitettyä vartta, jonka päässä on Al_2O_3 -kuula (alumiinioksidi) tai työtä varten valmistettuja kiinnikkeitä, joihin on kiinnitetty metallilevy. Laitteella voidaan määrittää kitka-arvo, jota voidaan käyttää verrattaessa laitteella testattuja materiaaleja keskenään. Testattaessa saatavaa kitkakerrointa ei voida verrata yleisiin kitkakertoimiin, vaan sitä käytetään verrattaessa tutkittavien kappaleiden kitka-arvoja keskenään. Lisäksi voidaan myös mitata kulutusura testauskappaleesta mikroskoopin avulla.



KUVA 6. Pin On Disk -testauslaitteisto (Sakari Tuovinen.)

7.2 Pin On Disk -kuulatesti ja kulutusuran mittaus

Sauvoille tehtiin Pin On Disk -testi, jossa käytettiin edellisistä kokeista poiketen pellin tilalla Al_2O_3 -kuulaa (kuva 7). Testissä käytettiin suurempaa kierrosnopeutta ja aika oli pidempi. Tämän testin tarkoituksena oli testata sauvojen pinnan kulumiskestävyyttä ja kitkaominaisuuksia. Testeissä sauvoihin muodostuneiden sauvojen urien syvyydet mitattiin mikroskoopilla ja saatiin tarkat arvot kappaleen kuluneisuudesta. Näin pystyttiin vertaamaan sauvoja keskenään todella tarkasti ja selvittämään niiden pinnoitteiden väliset erot.



KUVA 7. Sauvan koestusta Al_2O_3 -kuulaa käyttäen (Sakari Tuovinen.)

7.3 Silmämääräinen tarkastelu

Silmämääräistä tarkastelua käytettiin koko ajan kokeita tehtäessä ja sen avulla saatiin tietoja materiaalien käyttäytymisestä jo ennen tarkempia tutkimuksia. Kokeiden jälkeen tehtiin kappaleille vielä tarkempi silmämääräinen tarkastelu suurennuslasin avulla. Silmämääräisen tarkastelun avulla pystyttiin arvioimaan muutokset tutkitun vastinparin materiaalien pinnassa.

7.4 Kovuusmittaus

Kovuus on materiaalin mekaaninen ominaisuus, joka kertoo sen kyvystä vastustaa muodonmuutoksia eli naarmuuntumista, kulumista ja leikkaantumista. Kovuutta voidaan mitata usein eri tavoin; joista tärkeimmät ovat Rockwell -kovuus, Brinell -kovuus ja Vickers -kovuus. Metalliseosten kovuuteen vaikuttavat mm. seosaineet, kappaleen pintakäsittely, kylmämuokkausaste ja kappaleelle suoritettut lämpökäsittelyt. (Finfoocus Oy 2012.) Vickersin menetelmä valittiin käytettäväksi, koska se on helppokäyttöisem-

pi kuin vastaavat mittausmenetelmät. Lisäksi siinä vaaditut laskentamenetelmät ovat riippumattomia painimen koosta, ja samaa paininta voidaan käyttää kaikkiin materiaaleihin kovuudesta riippumatta.

7.4.1 Brinell -kovuuskoe

Brinellin kokeen kehitti ruotsalainen tohtori J.A. Brinell vuonna 1900. Brinell -kovuuskokeessa SFS-EN 10003-1 painetaan tutkittavan kappaleen pintaan kovametalli- tai karkaistu teräspallo tietyn suuruisella kuormalla. Menetelmässä mitataan pallon painauma testattavaan kappaleeseen staattisen kuormituksen alaisena, mittausajan ollessa vakio. Painauksen halkaisija mitataan ristimittana d_1 ja d_2 , jossa d on mittojen keskiarvo. Brinell -kovuuden tunnus on HBS tai HBW, riippuen käytetystä kuu-
lasta (karkaistu teräskuula HBS, kovametallikuula HBW). Teräspallo soveltuu käytettäväksi kovuuksiin 450 HB saakka, jonka jälkeen käytetään kovametallipalloa (tunnus HBW) kovuuteen 650 HB saakka. (Koivisto ym. 2006, 18.)

Kovuus saadaan laskemalla kuormituksen ja painumakalotin pinta-alojen lukuarvojen suhde:

$$\begin{aligned}
 HBS \text{ tai } HBW &= \frac{\frac{\text{kuormitus}}{kp}}{\text{painumakalotin pinta-ala} - \frac{\text{ala}}{\text{mm}^2}} & (7.1) \\
 &= \frac{0,102 * 2 * F}{\pi * D(D - \sqrt{D^2 - d^2})}
 \end{aligned}$$

jossa D = pallon halkaisija
 $d = (d_1 + d_2)/2$ = painauksen keskimääräinen halkaisija/mm
 F = kuormitus/N

Kuormitus tulee valita siten, että $d = (0,24 - 0,6) * D$. Yleensä Brinell -kovuuskoea käytetään pehmeän teräksen ja valuraudan kovuudenmittauksessa. Brinellin kovuusmittausmenetelmä jättää ison mittausjäljen ja siksi se soveltuu erinomaisesti epähomogeenisille materiaaleille. Toisaalta käytettävien suurien voimien vuoksi, ei koekappale voi olla kovin ohut. Käytettävien mittauskärkien kovuudet ja jäykkyydet ovat melko vaatimattomia, joten kovin kovien kappaleiden mittaaminen ei ole mahdollista. Kovat kappaleet vaativat luonnollisesti suuren kuorman ja siten aiheuttavat mit-
takärkeen helposti muodonmuutoksia. (Koivisto ym. 2006, 18.)

7.4.2 Rockwell -kovuuskoe

Itävaltalainen professori Ludwig esitti tavan mitata kovuutta painaman syvyyden perusteella. Menetelmässä mitataan kuinka paljon timanttikartio on painautunut materiaaliin sekä esikuormalla, että varsinaisella mittakuormalla. Nykyisin samaa menetelmää käytetään Rockwellin kovuuskokeessa, jossa teräskuulaa tai timanttikartiota painetaan tutkittavaan materiaaliin. Teräskuulaa käytettäessä menetelmää kutsutaan Rockwell B -kovuudeksi ja timanttikärkeä käytettäessä Rockwell C -kovuudeksi. Rockwellin kovuusmittaus soveltuu hyvin kovien aineiden rutiinitarkastukseen. Mitattaessa lieriömäisiä kappaleita, käytetään kovuuslukemille halkaisijasta riippuvia lujuuskertoimia. Menetelmän hyviä puolia ovat nopeus ja tarkkuus, sekä tuloksen riippumattomuus mittaajasta. Menetelmä soveltuu eri pinnanlaaduille eikä vahingoita koekappaletta. (Koivisto ym. 2006, 18–19.)

Rockwell C -kovuuskokeessa on painimena timanttikartio, jonka kärkikulma on 120° ja kärjen pyöristyssäde 0,2 mm. Kokeessa mitataan Brinell -kovuuskokeesta poiketen painimen tunkeumasyyvyys, jonka suuruus määrittää Rockwell C -kovuuden seuraavasti: Rockwell C, HRC = $100 - e/0,002$ mm, jossa e on painauman syvyyden pysyvä arvo. Rockwell B -kokeessa painimen kärkenä on karkaistu teräspallo. Tässäkin tapauksessa tunkeumasyyvyys määrää kovuusarvon. Rockwell B -koetta voidaan käyttää pehmeillä levy materiaaleilla. (Koivisto ym. 2006, 18–19.)

7.4.3 Vickers -kovuuskoe

Vickersin kovuuskokeen kehittivät Smith ja Sandland Vickers Ltd:llä vuonna 1924, koska he halusivat Brinellin kokeelle vaihtoehdoisen menetelmän materiaalin kovuuden mittaamiseen. Vickersin menetelmä on helppokäyttöisempi kuin vastaavat mittausmenetelmät, sillä siinä vaaditut laskentamenetelmät ovat riippumattomia painimen koosta, jonka lisäksi samaa paininta voidaan käyttää kaikille materiaaleille, riippumatta kovuudesta. (Koivisto ym. 2006, 19.)

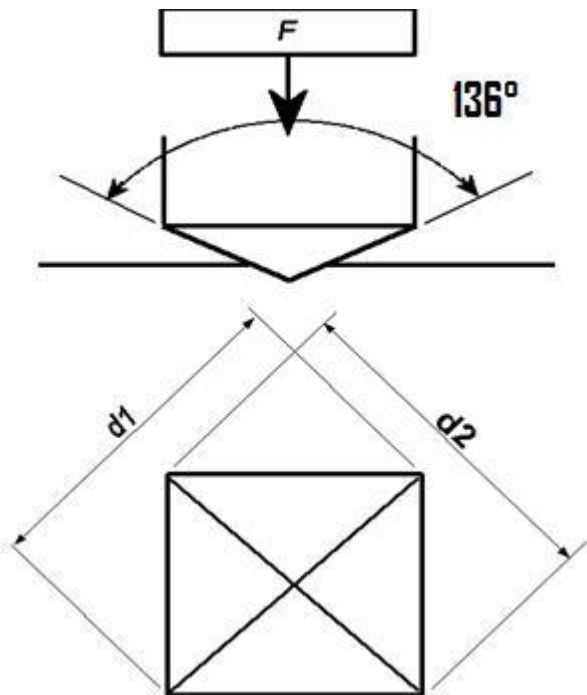
Vickersin kovuuskokeen nimeäminen määräytyy koevoiman mukaan (taulukko 4). Vickers -kovuuskokeessa painimena käytetään suoraa neliöpohjaista timanttipyramidia, jonka vastakkaisten sivutahkojen välinen kulma on 136° (kuvio 2). Paininkärki painetaan pintaa vasten kuormituksella 9,8 – 1981 N (1 – 100 kp). Kun kuormitus on poistettu, mitataan pintaan jääneen painuman lävistäjät mikroskoopin avulla ja eri

mittauskertojen keskiarvona saadaan laskettua materiaalin kovuus. Painuman jättämän jäljen oletetaan olevan neliöpohjaisen säännöllisen pyramidin muotoinen ja sen kärkikulman tulisi olla sama kuin paininkärjellä. (Koivisto ym. 2006, 19.) Vickers -kovuus on kuormituksen ja painuman pinta-alan lukuarvojen suhde:

$$HV = \frac{\frac{\text{kuormitus}}{kp}}{\frac{\text{painuman pinta-ala}}{mm^2}} \quad (7.2)$$

$$= \frac{0,102 * F * 2 \sin(136^\circ/2)}{d^2}$$

jossa F = kuormitus/N
 d = lävistäjien $d_1 + d_2$ aritmeettinen keskiarvo.



KUVIO 2. Vickers -paininkärki

Muiden kovuusmittausmenetelmien tapaan, myös Vickersin kovuuskokeessa tutkitaan materiaalin kykyä vastustaa plastista muodonmuutosta. Vickers -kovuuskoee soveltuu kaikille materiaaleille ja sillä on kaikista mittausmenetelmistä laajin kovuus-alue. Kovuuden yksikkö on Vickersin kovuus, joka merkitään HV. Eri massoilla mitatut arvot ovat keskenään vertailukelpoisia. Kuormitusmassa tulee valita ainepaksuuden ja mitattavan materiaalin mukaan. Kokeesta saatu tulos tai taulukosta katsottu

arvo merkitään lukuna tunnuksen HV eteen. Tunnukseen liitetään kuormitus (kilopondeina) ja sen vaikutusaikaa ilmaisevat luvut (sekunteina). Vaikutusaika tulee merkitä ainoastaan siinä tapauksessa, mikäli se poikkeaa määritellystä 10 – 15 s. arvosta. Merkintä 450HV30/50 tarkoittaa koetta, jossa kuormitus on ollut (294,2 N) 30 kp ja vaikutusaika 50 sekuntia. Mikäli vaikutusaika samaisessa kokeessa on määritelty 10 – 15 s., tulee koe merkitä seuraavasti: 450HV30. Vickersin kovuuskokeet metalleille on esitelty standardeissa SFS-EN ISO 6507-1, 6507-2 ja 6507-3. (Koivisto ym. 2006, 19.) Taulukossa 5 on esimerkkejä Vickersin kovuusarvoista eri materiaaleille.

TAULUKKO 4. Koevoimien alueet (Finfocus Oy 2012)

Koevoiman alue, F N	Kovuuden tunnus	Nimeäminen
$F \geq 49,03$	$\geq HV 5$	Vickersin kovuuskoe
$1,961 \leq F < 49,03$	$HV 0,2... < HV 5$	Vickersin kovuuskoe pienellä koevoimalla
$0,098 07 \leq F < 1,961$	$HV 0,01... < HV 0,2$	Vickersin mikrokovuuskoe

TAULUKKO 5. Esimerkkejä Vickersin kovuusarvoista

Materiaali	Arvo
316L ruostumaton teräs	140HV30
347L ruostumaton teräs	180HV30
Hilliteräs	55-120HV5
Rauta	30-80HV5
Austeniittinen teräs	220-250HV5
Ferriittinen teräs	150HV5
Martensiittinen teräs	700HV5
Alumiini	90HV3
Kupari	100HV3

ISO 6507- standardissa määritellään Vickersin kovuusalueiden painaumien suuruudet lävistäjän välille 0,02 – 1,4 mm. Mikäli painauman lävistäjän koko on alle 0,02 mm, kasvaa mittaustuloksen epävarmuus, eli painauman jäljen ollessa hyvin pieni heikkenee mittaustarkkuus. (Finfocus Oy 2012.)

ISO 6507- standardissa mainitaan, että koevoimaa pienennettäessä, yleensä mittaustulosten hajonta kasvaa. Tämä tulee huomioida erityisesti suoritettaessa Vickersin kovuuskoe pienellä koevoimalla sekä Vickersin mikrokovuuskokeessa, missä pai-

nauman lävistäjän mittaamiselle on omat rajoituksensa. Vickersin mikrokovuuskokeen painauman keskimääräisen lävistäjän mittausepävarmuus on yli $\pm 0,001$ mm. (Finfocus Oy 2012.)

Standardi SFS-EN ISO 6507-1 määrittää lisäksi millainen hyvän koekappaleen ja koeolosuhteiden tulisi olla. Tutkittavan pinnan tulisi olla mm. sileä ja tasainen, puhdas vieraista aineista ja oksidihilseestä, sekä erityisesti puhdas voiteluaineista, mikäli tuotestandardi ei toisin mainitse. Tutkittavan kappaleen pinnanlaatu on oltava hyvä, jotta painauman lävistäjä voidaan mitata siitä tarkasti. Pintaa valmistellessa tulee huomioida, ettei se pääse muuttumaan esimerkiksi liiallisen kuumenemisen tai kylmämuokkauksen johdosta. Standardin mukaan ohuita kappaleita tai pinnoitteita testattaessa, tulee koekappaleen paksuuden tai pinnan paksuuden olla vähintään 1,5 kertaa painauman lävistäjää paksumpi. Koe ei saa aiheuttaa tutkittavan pinnan vastapuolelle muodonmuutosta. Standardin mukaan koe tulisi tehdä yleensä 10–35 °C:n lämpötilassa. Koekappale tulee asettaa niin, ettei se pääse liikkumaan kokeen aikana. Lisäksi laitteeseen ei saa kokeen aikana kohdistua iskuja, eikä se saa altistua värinäille. (Finfocus Oy 2012.)

7.5 Pinnankarheusmittaus

Valmistusmenetelmästä riippumatta on mahdotonta valmistaa täysin tasaista pintaa. Pinta muodostuu pinnankarheuden ulokkeista ja niiden välisistä laaksoista. Yleisimmin pinnankarheudesta käytetään R_a -arvoa, joka ei kuitenkaan kuvaa kovin hyvin pinnankarheutta tribologiselta kannalta katsottuna. Esimerkiksi kuormitettaessa vastapintaan kahta R_a -arvoltaan samansuuruisia kappaletta, voi niiden käyttäytyminen poiketa toisistaan huomattavasti. Tunnusluku R_a tarkoittaa keskipoikkeamaa, joka on kaikkien mitattujen profiilin ja keskiviivan välisten etäisyyksien aritmeettinen keskiarvo. Englanninkielisessä kirjallisuudessa käytetään siitä nimeä C.L.A. (Center Line Average). Voidaan myös käyttää tämän sijasta neliösummaa (r.m.s.), jonka arvo ei tavallisilla pinnoilla poikkea paljon R_a -arvosta. (Sunquist 1986, 48.)

Keskipoikkeama saadaan yhtälöstä

$$R_a = \frac{1}{L} \int_0^L |z(x)| dx \quad (7.3)$$

missä L on mittausjakson pituus. Keskipoikkeama voidaan laskea myös profiilin ja keskiviivan välisten etäisyyksien keskiarvona

$$R_a \approx \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |z_i| \quad (7.4)$$

missä n on huomioon otettavien profiilipoikkeamien lukumäärä. Neliöllisen keskipoikkeaman R_q , eli RMS-arvon tunnuksena on yleensä σ . Se voidaan laskea yhtälöstä

$$R_q = \sqrt{\frac{1}{L} \int_0^L z^2(x) dx} \quad (7.5)$$

Edellä mainitut pinnankarheuden suuret on määritelty standardissa SFS-EN-ISO 4287.

Esimerkki laskusta sinikäyrän muotoiselle pinnalle

$$R_a = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} \sin \alpha d\alpha = \frac{2}{\pi} \approx 0,64 \quad (7.6)$$

$$r. m. s. = \sqrt{\frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} \sin^2 \alpha d\alpha} = \sqrt{\frac{1}{2}} \approx 0,71 \quad (7.7)$$

joten

$$R_a = 0,9 r. m. s.$$

Pinnankarheuden oordinaattojen jakauman ollessa Gaussin jakauman mukainen, saadaan keskipoikkeaman R_a ja RMS-arvon σ välille yhteys

$$\sigma = \sqrt{\frac{\pi}{2}} R_a \approx 1,25 R_a \quad (7.8)$$

On mahdollista, että jakauma on vinoutunut. Pintojen kosketuksissa osallisena ovat vain pinnankarheuden huippujen uloin osa, jolle Gaussin jakauma on hyvä approksimaatio. (Kivioja ym. 2010, 24–26.)

Kun pinnat puristetaan vastakkain, pinnankarheuden ulokkeet kantavat kuorman. Kuorman ollessa pieni, ei materiaalien myötöraja ylitä ja kosketus on elastinen. Yleensä kosketuksessa osa pinnankarheuden huipuista muokkautuu plastisesti ja osa elastisesti. Todellinen kosketuspinta-ala A_{tod} muodostuu edellä mainittujen koske-

tusalojen summasta ja on joko pienempi tai samansuuruinen kuin näennäinen pinta-ala A_n . (Kivioja ym. 2010, 24–26.)

Pinnankarheuden profiilista voidaan esittää myös oordinaattojen (tasokoordinaatiston y-koordinaatti) jakauma $\varnothing(z)$ tai laskea kantokäyrä, joka kuvaa hyvin pinnan tribologisia ominaisuuksia. Koveran ja nopeasti laskevan kantokäyrän omaava pinta on tribologisissa kosketuksissa epäedullinen, sillä terävät pinnankarheuden huiput kuluvat nopeasti. (Kivioja ym. 2010, 24–26.)

Monilla pinnoilla oordinaattojen jakauma noudattaa Gaussin jakaumaa, eli normaali-jakaumaa

$$\varnothing(z) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{z^2}{2\sigma^2}} \quad (7.9)$$

missä σ on hajonta eli standardipoikkeama (RMS-arvo)

Mikäli metallipinta on sorvattu, porattu tai jyrstetty, on sen pinnankarheuden R_a -arvo välillä 0,2 – 50 μm , riippuen työstötavan yksityiskohdista. Hiomalla saavutetaan R_a -arvo 0,1 μm ja kiillottamalla 0,01 μm . Hiveltämällä ja hiertämällä voidaan päästä aina arvoon 0,005 μm saakka. (Kivioja ym. 2010, 24–26.)

8 TULOKSET JA TULOSTEN ANALYSOINTI

8.1 Pin on Disk -kulutus- ja kitkamittauskoe

Rullamuovauskoneissa pelti taipuu erilaisiin kulmiin, joten tutkimuksissakin on syytä kokeilla erilaisia kulmia. Näin saadaan selville, kuinka erilaiset kulmat ja säteet vaikuttavat pellin rakenteeseen ja kestävyYTEEN sekä kuinka ne vaikuttavat rullan pinnoitteen kulumiseen. Esimerkiksi suoralla pellillä saadut tulokset eroavat kaarevalla eli taivutetulla pellillä saaduista tuloksista keskenään. Voidaanko siis päätellä, että pellin muokkaaminen vaikuttaa joillain pinnoitteilla pellin ominaisuuksiin ja näin kuluttaa sauvaa eri tavoin, vaikka vastinkappaleena toimiva pelti olisikin sama.

Pellin profiililla oli suuri vaikutus kitkaan, mikä näkyi selvästi testeissä (taulukko 6). Pinnoitteiden keskinäiseen paremmuuteen vaikutti vastinkappaleen eli pellin profiili. Esimerkiksi kulmakiinnikkeellä testattaessa sai kovakromi parhaimman eli pienimmän kitkakertoimen, kun taas kemiallinen nikkeli oli heikoin. Tasopintakiinnikkeellä testattaessa oli kemiallinen nikkeli paras.

TAULUKKO 6. Kitkakertoimien keskiarvot eri pinnoitteilla testattuna

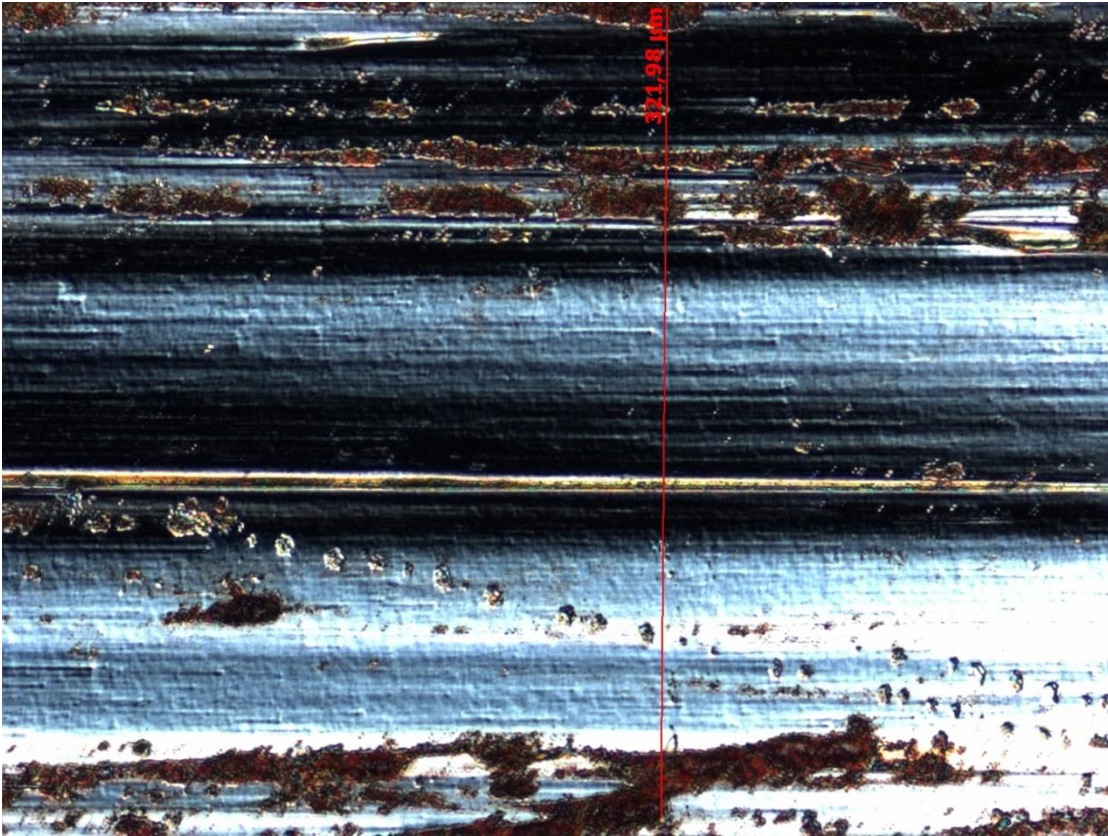
Kiinnike	Kovakromi	Nitrattu	Pinnoittamaton	Kemiallinen nikkeli
Kulma	0,49	0,73	0,76	0,66
Kaari	0,59	0,65	0,74	0,70
Taso	0,34	0,39	0,29	0,27

8.2 Pin On Disk -kuulatesti ja kulutusuran mittaus

Kuulatestissä saavutetut kitkakertoimet eivät selvänä kuvaa todellisesta tilanteesta. Tulosten avulla saadaan jonkinlainen kuva kappaleeseen kohdistuvasta kitkasta. Tullee kuitenkin huomioida, että rullamuovauskoneessa rullaa vasten painautuu pelti, kun taas tässä kokeessa käytetty kuula on alumiinioksidia, joten se ei vastaa todellista materiaalia.

Kun kappaleeseen oli ajettu kulutusura, se tuli asettaa mikroskooppiin ja mitata kulutusuran syvyys. Mikroskooppi oli yhdistetty tietokoneeseen, johon kuva mikroskoopil-

ta tuotiin. Tästä kuvasta saatiin laskettua urasyvyys Axio Vision –ohjelmaa käyttämällä (kuva 8).



KUVA 8. Nitrattu sauva (Sakari Tuovinen.)

Tuloksista voidaan huomata, kuinka pinnankovuus vaikuttaa kulumiseen, kun verrataan sauvojen pinnankovuuksia (taulukko 7) kuulatestissä syntyneisiin urasyvyyksiin (taulukko 8).

TAULUKKO 7. Al₂O₃-kuulalla suoritetun Pin On Disk -testin mittauspöytäkirja

Sauva	Kitkakerroin	rpm	Paino (g)	Aika (min)
Kovakromi	0,708	300	200	30
Nitrattu	1,008	300	200	30
Pinnoittamaton	0,982	300	200	30
Kemiallinen nikkeli	0,747	300	200	30

TAULUKKO 8. Kappaleeseen syntynyt urasyvyys Al₂O₃-kuulakokeessa

Pinnoite	Urasyyvyys (μm)
Kovakromi	1,9
Nitrattu	3,7
Pinnoittamaton	28,9
Kemiallinen nikkeli	6,7

8.3 Silmämääräinen tarkastelu

Ennen varsinaisia testejä taivutettaessa peltiä kaari- ja kulmakiinnikkeeseen pystyi huomaamaan, kuinka peltin taivuttaminen aiheutti halkeamia maalipintaan. Kappaleiden kulutuskestävyydestä pystyi heti testin jälkeen tekemään johtopäätöksiä helposti. Kappaletta silmämääräisesti tarkasteltaessa saattoi huomata millainen se oli kulutuskestävyydeltään. Osaan tutkittavien peltien ja sauvojen pintaan oli muodostunut mustaa ainesta eli palanutta maalia, kun taas osaan kappaleita ei ollut jäänyt mitään kiinni. Tämä maalin kulumisen ja siitä aiheutuva tarrautuminen aiheutti kappaleissa tärinää, jonka pystyi helposti näkemään Pin On Disk -laitteen mittauspäästä.

Sauvojen kulumisen pystyi havaitsemaan melko selvästi kuulatestissä, sillä kulutusurien erot olivat osittain melko suuria. Peltitesteissä pystyi jo Pin On Disk -testien aikana huomaamaan, kuinka maali kului pelleistä. Joidenkin peltien maalipinta pysyi melkein vahingoittumana, kun taas toisien kului puhki melko nopeasti.

8.4 Vickersin mikrokovuuskoe

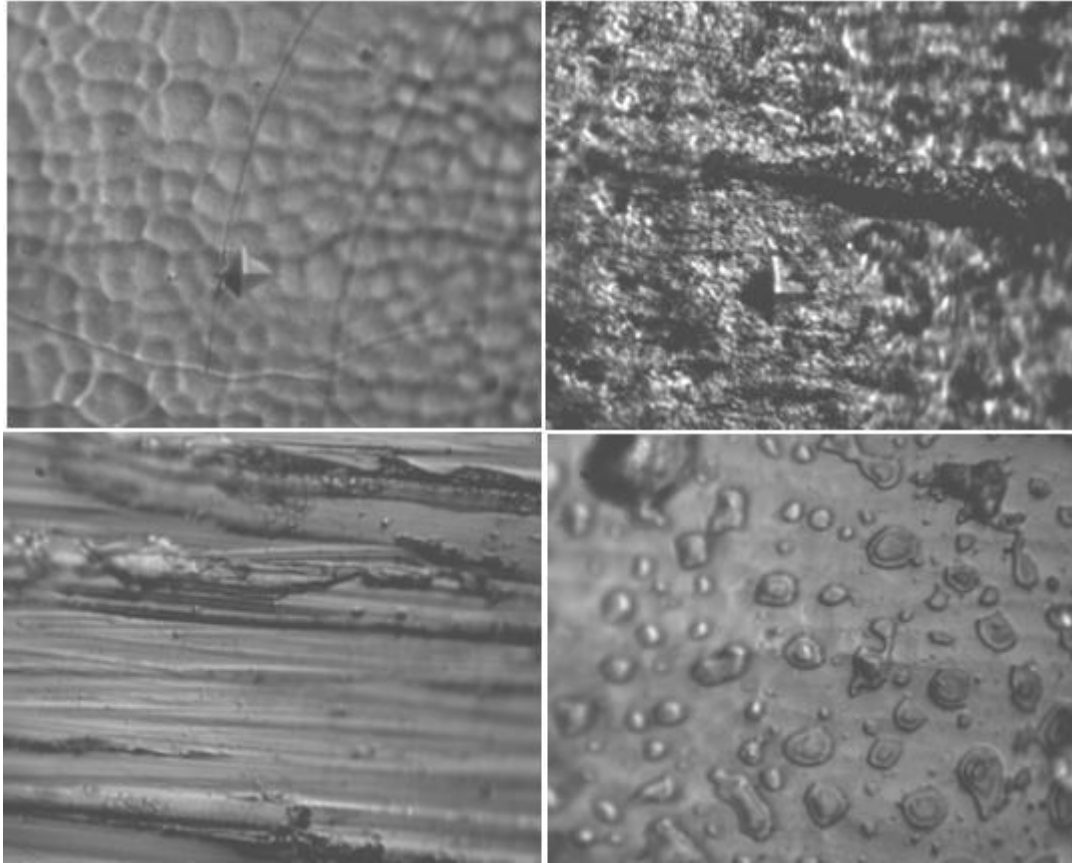
Kovuuskokeeksi päätettiin valita Vickersin kovuuuskoe. Valintaa puolsivat sen helppokäyttöisyys sekä mahdollisuus käyttää samaa paininkärkeä tutkittavasta materiaalista riippumatta. Myös tuloksia oli helppo vertailla keskenään.



KUVA 9. Mikrokovuusmittalaite (Savonia-ammattikorkeakoulu.)

Pinnankovuuden mittaamiseen käytettiin Matsuzawa MMT-X7 -mittalaitetta (kuva 9). Laitte painoi jäljen tutkittavaan kappaleeseen, minkä jälkeen painauman halkaisijat

mitattiin tietokoneen näytöltä Picsara -ohjelman avulla, jolla pystyi huomaamaan erot kappaleiden pintarakenteessa (kuva 10).



KUVA 10. Ylhäällä vasemmalla kovakromi, oikealla nitrattu, alhaalla vasemmalla pinnoittamaton ja oikealla kemiallinen nikkeli (Sakari Tuovinen.)

Kovuusmittauksia tehtiin kymmenen yhtä sauvaa kohden, ja tuloksista laskettiin kovuuden keskiarvo. Kovuusmittaustuloksista voi huomata, kuinka paljon suurempi pinnankovuus kovakromilla on muihin nähden (taulukko 9). Verrattaessa pinnoittamattoman kappaleen pinnankovuuksia pinnoitettujen kappaleiden pinnankovuuksiin nähdään, kuinka suuri vaikutus pinnoitteella on kappaleen pinnankovuuteen ja tämän myötä sen kulutuksenkesto.

TAULUKKO 9. Sauvojen pinnankovuudet

Pinnankovuus (HV)			
Kovakromi	Nitrattu	Pinnoittamaton	Kemiallinen nikkeli
988,9	645,3	309,3	521,9
981,6	560,4	315,8	567,8
988,9	637,6	314,5	546,1
986,5	589,7	310,9	522,7
991,7	603,8	308,3	558,2
983,8	621,1	305,7	536,8
980,1	593,7	312,6	552,6
985,2	587,6	314,4	546,9
986,4	608,9	311,7	539,8
985,4	564,6	314,8	531,3
986	601	312	542

8.5 Pinnankarheusmittaus

Pinnankarheuden mittaamiseen käytettiin Mitutoyo SJ-201P -mittalaitetta (kuva 11). Laitetta varten oli rakennettu erillinen kiinnitin, johon itse laitteen ja tutkittavan kappaleen pystyi asettamaan. Jo testausten alkuvaiheessa pystyi huomaamaan, että laite antoi luotettavia, lähes identtisiä mittaustuloksia testattaessa samoja materiaaleja useaan kertaan. Laitetta käytettäessä tulee ottaa huomioon, ettei laite anna luotettavia tuloksia, mikäli se liikkuu tai siihen kohdistuu jonkinlaista tärinää, esim. jonkin laitteen resonointia. Tämän vuoksi testit suoritettiin paikassa, jossa edellä mainitut asiat eivät päässeet vääristämään tuloksia.



KUVA 11. Sauvan pinnankarheuden mittaus pinnankarheusmittarilla (Sakari Tuovinen.)

Pinnankarheusmittauksissa ei sauvojen pinnankarheuksissa ollut suuria eroja (taulukko 10). Kovakromin pinnankarheus oli pieni, kuten tuloksista näkee. Puolestaan peltien väliset erot pinnankarheudessa olivat todella merkittäviä (taulukko 11). Suuret erot peltien pinnankarheuksissa eivät kuitenkaan vaikuta kovin suuresti kitkakertoimeen (taulukko 12).

Pellit 2 ja 5 saivat lähes identtiset pinnankarheuden arvot. Näissä pelleissä pinnoite oli samanlainen väriä lukuun ottamatta. Tämä osaltaan kertoo tulosten luotettavuudesta. Vertailtaessa peltien kitkakertoimien keskiarvoja jotka saatiin kaikilla eri pinnoilla ja kiinnikkeillä, voidaan todeta, ettei pellillä ole kovin suurta merkitystä kitkakertoimeen. Toisaalta kokeessa testattiin yhden vastinparin kerrointa, kun taas rullamuovauslinjastossa

TAULUKKO 10. Sauvojen pinnankarheudet

Pinnankarheus (μm)			
sauva1/ kovakromi	sauva2/ nitrattu	sauva3/ pinnoittamaton	sauva4/ kemiallinen nikkeli
0,41	0,52	0,71	0,75
0,51	0,56	0,65	0,64
0,40	0,50	0,61	0,69
0,45	0,48	0,71	0,57
0,39	0,62	0,73	0,51
0,40	0,50	0,65	0,60
0,47	0,59	0,66	0,66
0,46	0,51	0,75	0,67
0,44	0,54	0,68	0,64

TAULUKKO 11. Peltien pinnankarheudet

Pinnankarheus (μm)					
pelti 1	pelti 2	pelti 3	pelti 4	pelti 5	pelti 6
0,53	0,28	4,44	5,66	0,29	1,14
0,52	0,25	4,76	5,63	0,31	1,06
0,48	0,35	4,55	5,80	0,38	0,99
0,46	0,31	5,25	5,66	0,35	0,98
0,41	0,29	5,49	5,61	0,30	1,12
0,53	0,27	5,22	5,77	0,34	1,08
0,43	0,32	5,33	5,60	0,27	1,02
0,48	0,26	4,39	5,59	0,31	1,11
0,53	0,30	5,03	5,70	0,30	1,01
0,49	0,29	4,94	5,67	0,32	1,06

TAULUKKO 12. Kaikkien testien kitkakerrointen keskiarvot eri pelloille

Pelti	Kitkakerroin
kiiltävä vaaleanruskea	0,51
kiiltävä tummanruskea	0,51
karhea ruskea	0,59
harmaa	0,59
punainen	0,49
galvanoitu	0,56

9 MITTAUSLAITTEEN VALINTA JA MITTAUSVIRHEET

Mittauslaitteet ovat tärkeä osa tuotantoketjua, sillä ne vaikuttavat tämän taloudellisuuden. Siksi niiden valintaan ja käsittelyyn on kiinnitettävä huomiota. Mittausvirheet voivat tulla kalliiksi, mikäli hyväksytään virheellisiä ratkaisuja, jotka tulevat estämään kokonaisuuden kunnollisen toiminnan. Toinen virhe tapahtuu, kun hylätään koneita tai osia, jotka olisivat kelvollisia. (Ihalainen ym. 2005, 434.)

9.1 Mittauslaitteen valinta

Mittauslaitteen valinnassa tulee ottaa huomioon erilaisia asioita, joista tärkeimmät ovat:

- mitattava kohde ja sen toleranssit
- käytettävissä oleva välineistö
- tutkimukseen käytössä oleva aika
- erityisolosuhteet (esim. mittaukset kylmissä tai kuumissa olosuhteissa). (Ihalainen ym. 2005, 434.)

Mittauslaitteista osa soveltuu paremmin suurehkojen kappaleiden tutkimista varten, kun taas osa soveltuu pelkästään pienempien tutkimiseen. Mittaustarkkuuden parantuessa helpottuu myös valmistus, sillä valmistustoleranssin ei tarvitse olla niin tarkka, kuin jos mittatarkkuus olisi heikompi. Yleisesti on pidetty hyväksyttävänä, ettei mittausepävarmuus olisi suurempi kuin yksi kolmasosa toleranssialueesta. (Ihalainen ym. 2005, 434–435.)

9.2 Virhearviointi

Kokeellisissa mittauksissa virhe merkitsee yleensä mittauksiin liittyvää virhearviota, joka kuvaa mittauksen tarkkuutta. Mittausvirheet jaotellaan kolmeen eri tyyppiin: karkea virhe, systemaattinen virhe ja satunnainen virhe. (Ihalainen ym. 2005, 436.)

9.2.1 Systemaattinen virhe

Systemaattisilla virheillä on tietty suuruus ja suunta. Systemaattiset virheet voivat johtua mm. vääristä mittaustavoista, viallisista mittalaitteista, olosuhteista tai väärin kalibroidusta mittalaitteesta. Systemaattinen virhe voidaan poistaa parantamalla menetelmää tai mittauslaitetta sekä kouluttamalla mittaajaa. Esimerkiksi käytettäessä kovuusmittauslaitetta saattaa se antaa väärän tuloksen, koska sitä ei ole kalibroitu. Tällaisissa tilanteissa virhe voidaan mahdollisesti korjata kalibroimalla mittalaite standardi- eli kalibrintipalan avulla. Systemaattisia virheitä ei saisi olla tutkimuksissa, vaan ne tulisi pystyä karsimaan. Niiden vaikutuksen arviointi on todella vaikeaa. Mikäli virheen syyt tunnetaan, voidaan niiden vaikutus mittaustuloksiin korjata laskemalla. Systemaattista virhettä ei saada poistumaan eikä pienenemään, vaikka mittaus toistettaisiin. (Ihalainen ym. 2005, 436.)

9.2.2 Satunnainen virhe

Satunnainen eli tilastollinen virhe on mittauksissa lähes aina olemassa. Sillä ei ole tiettyä suuntaa eikä suuruutta, vaan se vaihtelee mittauksesta toiseen. Satunnaisia virheitä pystytään pienentämään parantamalla menetelmiä, olosuhteita ja mittalaitteita tai toistamalla mittaus useita kertoja ja laskemalla näistä tuloksista keskiarvo. Näin erisuuntaiset virheet kumoavat toisensa, jolloin virheet eivät yleensä aiheuta vääristymiä tuloksiin. Kokeellisissa tutkimuksissa satunnaisen virheen osuus voidaan havaita, mikäli mittalaite on tarpeeksi tarkka. Virheet jakautuvat satunnaisesti, usein noudattaen Gaussin normaalijakaumaa. Kokeellisessa tutkimuksessa on mahdollista laskea satunnaisen mittausvirheen arvio. Virheen suuruus voidaan määrittää toistamalla mittaus 10 – 20 kertaa. (Ihalainen ym. 2005, 436.)

9.2.3 Karkea virhe

Karkeasta virheestä käytetään arkikielessä nimitystä virhe. Synä karkeisiin virheisiin ovat vääränlaiset mittausmenetelmät tai inhimilliset seikat. Karkea virhe voi johtua mittauslaitteen epätarkoituksenmukaisesta tai vääränlaisesta käsittelystä, lukemavirheestä tms. Karkeat virheet ovatkin samoja, tosin huomattavan suuria virheitä kuin

systemaattisissa ja satunnaisissa virheissä. Karkeat virheet tulisi kuitenkin pystyä poistamaan suorittamalla mittaukset huolellisesti ja mittausten ennakkosuunnittelulla. Mikäli mittaustuloksissa epäillään syntyneen karkea virhe, pyritään tulokset hylkäämään. Mittauspisteitä ei tulisi kuitenkaan hylätä, mikäli mittaajalla ei ole tietoa, mistä erikoinen arvo saattaa johtua. Perusteeton hylkääminen on vastoin hyvän tieteenteon periaatteita. (Ihalainen ym. 2005, 436.)

Yleisimpiä virhelähteitä mittauksissa ovat:

- lämpötilaerot
- voimat
- mittaaja
- työkappaleen virheet
- mittausvälineet. (Ihalainen ym. 2005, 436.)

9.3 Mittaustarkkuuteen vaikuttaminen

Kappaleiden testaamisessa Pin On Disk -laitteella tuli ottaa huomioon monia asioita. Vastinparien eli tutkittavien kappaleiden tuli olla puhtaat. Nämä puhdistettiin denaturoimattomalla alkoholilla ennen testausta. Mikäli sauvaa ei puhdistaisi jokaisen testauksen jälkeen, aiheuttaisi siihen kiinni jäänyt aines virheitä mittauksissa tai jopa käsistä tarttunut rasva voi vaikuttaa kitkakertoimeen.

Ilmankosteus tuli ottaa huomioon, sillä se voi vaikuttaa kitkaan. Näissä testeissä sillä ei ollut merkittävää vaikutusta tuloksiin, sillä testit suoritettiin melko samanlaisissa ilmankosteuksissa ja jokainen sarja testattiin samassa ilmankosteudessa.

Laitteeseen ei saanut missään nimessä koskea testauksen aikana, sillä jo pieninkin kosketus vaikuttaa huomattavasti tuloksiin. Itse laite tuli kalibroida siten, että se asetettiin painojen avulla tasapainoon ja testattava kappale mahdollisimman lähelle pyörivää sauvaa ennen painon asettamista. Näin kappale saatiin oikeaan asemaan, eikä virheellinen asento päässyt vaikuttamaan tuloksiin.

Lämpötila vaikuttaa materiaalien ominaisuuksiin. Työssä onkin otettu huomioon mahdolliset lämpötilan vaihdokset. Lämpötila tosin pysyi testien aikaan lähes samana ja

tietty testiryhmä suoritettiin samassa lämpötilassa. Näin ollen lämpötilan vaikutusta tuloksiin ei tarvitse ottaa huomioon tässä tutkimuksessa. Lisäksi testit suoritettiin sisälämpötilassa, kuten rullatkin tulevat käytössä olemaan.

Mittauksia tehdessä, tulee koestettavan kohdan olla koskematon. Mikäli kappaleeseen on ajettu esimerkiksi kulutusura alumiinioksidi-kuulalla PinOnDisk -laitteella, ei siitä kohdasta tule testata enää uudelleen. Sama koskee myös Vickersin kovuuskoetta. Mikäli kokeita tehtäisiin useasti samoihin kohtiin kappaleita, pääsisivät tulokset vääristymään huomattavasti, mikä tekisi kokeista epäluotettavia. Edellä mainitut asiat huomioitiinkin testauksissa käyttämällä pelkästään koestamatonta pintaa.

Olipa koemittaus sitten mikä hyvänsä, koe tehtiin useaan kertaan ja saaduista tuloksista laskettiin keskiarvo. Näin saatiin mitattu tulos mahdollisimman lähelle oikeaa arvoa. Tapauksissa, joissa esiintyi tulosten välillä paljon hajontaa, pudotettiin testisarjasta pienin ja suurin tulos, jolloin tuloksiin saatiin entistä enemmän tarkkuutta.

Ennen varsinaisia mittauksia mittalaite tuli kalibroida. Näin varmistettiin, että laitteen antamat tulokset olivat luotettavia. Esimerkiksi Vickers -kovuusmittausta ennen tuli laite kalibroida kalibrointipalan avulla.

10 KEHITYSIDEOITA

Tämän opinnäytetyön pohjalta olisi hyvä mahdollisuus jatkaa työtä eteenpäin. Aikaisemmin tutkituista pinnoitteista voisi pudottaa jonkin pois ja ottaa tilalle esimerkiksi karkaistun teräksen. Käsittelynä karkaisu olisi edullisempi verrattuna esimerkiksi kovakromaukseen ja sillä saavutettaisiin noin 560 HV:n kovuus. Toinen mahdollinen pinnoite voisi olla nikkeli-boorinitridi, jolla saavutetaan todella pieni kitkakerroin ja lämpökäsittelynä todella hyvä kulutuksenkesto.

Testiolosuhteita voisi muokata niin, että ne vastaisivat enemmän rullamuovauskoneen todellista käyttöympäristöä, näin tuloksetkin voisivat olla lähempänä todellisuutta. Testimateriaaleihin kohdistuvat pintapaineet voisi määrittää ja mahdollisesti saada molemmat vastinparit liikkumaan, kuten todellisissa olosuhteissa.

Tulisi miettiä, mistä johtuvat erot kitkassa pellin profiilin muuttuessa. Kuten miksi kemiallisella nikkelillä saavutetaan pienimmät kitkakertoimen arvot tasaisella pellillä testattuna, kun taas huonoimmat arvot 90° kulmaan taivutetulla pellillä.

Olisi syytä määrittää kuinka suuri on kitkan vaikutus rullamuovauslinjaston toimivuuteen. Annetaanko kitkalle painoarvoa enemmän kuin kustannuksille, eli tulisi selvittää kuinka suuri tulee olla ero, jotta kalliimpi pintakäsittely valitaan huolimatta kustannuksista.

Mahdollisesti rullamuovauskoneessa voisi käyttää useampaa kuin yhtä pinnoitetta rullissa. Voitaisiin käyttää mahdollisuuksien mukaan edullista, mutta kohtuulliset kitka-arvot antanutta pinnoitetta siellä, missä rasitus ei ole kovin suuri rullalle. Esimerkiksi alussa kemiallista nikkeliä pellin ollessa vielä suora, koska suoralla testattuna kemiallisella nikkelillä saatiin hyviä tuloksia. Myöhemmässä vaiheessa pellin profiilin jo muututtua voitaisiin käyttää esimerkiksi kovakromipinnoitetta.

11 YHTEENVETO

Tämän opinnäytetyön aiheena oli tutkia rullamuovauskoneen rullien pinnoitteita. Ta-
voitteena oli tutkia erilaisia pinnoitteita ja löytää näistä paras pinnoite käytettäväksi
Samesor Oy:n valmistamissa rullamuovauskoneen rullissa.

Tulokset kitkan osalta poikkesivat aikaisemmista kokemuksista, joita Samesor Oy oli
käytännössä saanut eri pinnoitteista. Tämä luokin mielenkiintoa tutkia lisää pinnoittei-
ta ja mahdollisesti löytää parempia pinnoiteratkaisuja tulevaisuudessa.

Kemiallinen nikkeli ei ole käytössä Samesor Oy:n linjastoissa, vaan yritys käyttää
rullien pinnoitusmenetelminä nitrausta ja kovakromausta. Kemiallinen nikkeli antoi
kuitenkin pienimmät kitkakertoimet tasopintakiinnikkeellä testattaessa, joten on syytä
miettiä kemiallisen nikkelin käyttämistä tulevaisuudessa. Tässäkin asiassa vaikuttaa
hintaa. Mikäli se olisi kilpailukykyinen, voisi se olla vaihtoehto muille pinnoitteille. Li-
säksi kemiallisen nikkelin lämpökäsittelyllä saataisiin pinnoitteeseen lisää kovuutta ja
siten kulutuksenkestoa. Samalla myös pinnoitteen adheesio eli kiinnipysyvyys pa-
ranisi.

Pinnoittamaton teräs voidaan sulkea käytettävistä pinnoitteista pois, mikäli käyttö on
runsasta ja pinnoitteelta vaaditaan paljon, sillä se on kulutuksenkestoltaan melko
heikko pinnoitettuihin nähden. Sen kitka-arvot olivat kuitenkin hyvät kitka-arvot taso-
pintakiinnikkeellä testattaessa. Toisaalta sen edullisuus houkuttelee ja sitä voisikin
harkita käytettäväksi rullaan kohdistuvan kitkan ollessa vähäistä sekä silloin, kun rul-
lan käyttöaste ei ole korkea.

Nitrattu teräs antoi suhteellisen hyviä kitka-arvoja testattaessa kaarikiinnikkeellä, ol-
len kuitenkin heikoin kaikista pinnoista tasopintakiinnikkeellä testattaessa. Pinnoite-
tusta se sai huonoimman kitka-arvon testattaessa kulmakiinnikkeellä. Voisikin miettiä
nitrattujen rullien käyttämistä sellaisissa paikoissa rullamuovauskonetta, joissa pelti
taittuu pienelle halkaisijalle kaarimaisesti. Etuna nitrattun käyttämisessä on sen edulli-
suus, sillä nitrauksen kustannukset ovat noin kymmenesosan kovakromauksesta.

Kovakromi antoi kaikista materiaaleista pienimmät kitka-arvot testattaessa kulma- ja
kaarikiinnikkeellä. Pinnoitetuista kappaleista se oli huonoin tasopintakiinnikkeellä tes-
tattaessa. Tulokset huomioiden voidaankin sanoa, ettei ole järkevää käyttää kova-
kromattua rullaa paikoissa, joissa pelti on vielä profiililtaan suora. Näissä paikoissa
järkevämpää olisi käyttää pinnoittamatonta rullaa, sillä kovakromaus on melko kallis
pinnoitusmenetelmä.

Työn tuloksena saatiin laaja raportti tutkituista pinnoitteista. Tuloksia voidaan käyttää hyväksi, valittaessa pinnoitusratkaisuja rullamuovauskoneen rulliin. On kuitenkin muistettava että kyseessä on laboratoriotesteissä saadut tulokset, jotka aina eroavat todellisista olosuhteista.

On tärkeää tietää, millaisia ominaisuuksia pinnoitteelta vaaditaan. Tulee selvittää, kuinka paljon tulee parhaimmat arvot antavalla pinnoitteella olla eroa halvempaan pinnoitteeseen, jotta se on järkevää valita. Pinnoite kannattaakin valita käytön mukaan. On turha maksaa pinnoitteesta paljon, ellei siitä ei ole suurta hyötyä. Toisaalta taas vaativiin kohteisiin kannattaa valita kalliimpi pinnoite, jos sen ominaisuudet voidaan hyödyntää.

LÄHTEET

Aho, K. 1993. Tribologia perusasioita. Tampere: Tammer-Paino Oy.

Bodycote Lämpökäsittely Oy. 2007. Lämpö- ja pintakäsittelyopas.

Finfocus Oy 2012. Yrityksen www-sivu [viitattu 21.12.2012]. saatavissa:

Holmberg, K. & Matthews, A. 1994. Coatings Tribology - Properties, Techniques and Applications in Surface Engineering. Amsterdam: Elsevier.

Ihalainen, E., Aaltonen, K., Aromäki, M. & Sihvonen, P. 2005. Valmistustekniikka. Helsinki: Hakapaino Oy.

Kaarinan Karkaisutyöt Oy 2012. [verkkosivu] Yrityksen www-sivu [viitattu 6.1.2013]. Saatavissa: <http://www.karkaisu.fi/index.phtml/art/10328/t/articles1>

Kivioja, S., Kivivuori, S. & Salonen P. 2010. Tribologia - Kitka, kuluminen ja voitelu. Helsinki: Otatieto.

Koivisto, K., Laitinen, E., Niinimäki, M., Tiainen, T., Tiilikka, P. & Tuomikoski, J. 2006. Konetekniikan materiaalioppi. Helsinki: Edita Prima Oy.

Komusaari, H. & Suosalmi, T. 2003. Kromaus. Suomen Galvanotekninen Yhdistys.

Lämsä, J., Kiuru, H. 2012. Ultralujat rakenne- ja kulutusteräokset - Tärkeimmät ominaisuudet suunnittelulle. CASR-Steelpolis-verkostohanke. Verkkosivu. [viitattu 21.2.2013] Saatavissa: <https://wiki oulu.fi/download/attachments/28082956/Ultralujat+rakenne-+ja+kulutuster%C3%A4kset++t%C3%A4rkeimm%C3%A4t+ominaisuudet+suunnittelulle.pdf>

Neale, M.J. The Tribology handbook. 2001. Oxford: Butterworth-Heinemann.

Nygård, M. 2012. Rullamuovattavan ohutlevytuotteen suunnittelu - Valmistusnäkökohtien huomiointi. Esitelmä. Ohutlevypäivät 22. - 23.3.2012. Sokos Hotel Kimmel. Joensuu.

Samesor Oy. 2012. Production Lines. Esite.

Schlesinger, M. & Paunovic, M. 2000. Modern Electroplating. New York: John Wiley & Sons, Inc.

SFS-EN ISO 6158, Metalliset pinnoitteet. Sähkösaostetut kromipinnoitteet teknisiin tarkoituksiin. 2005. Suomen standardisoimisliitto SFS. Helsinki: SFS.

Sundquist, H. 1986. Tribologian perusteet. Helsinki: Otakustantamo.

Tekninen Tiedotus 1/86. Materiaalinvalinta – Kulumista kestävät materiaalit ja pinnoitteet. Helsinki: Metalliteollisuuden Kustannus Oy.

Tunturi, P. & Tunturi, P. 1999. Metallien pinnoitteet ja pintakäsittelyt. Tampere: Tammer-Paino Oy.

